

Application and development of laser micro-nano processing technology in silicon wafer processing

Huanxin Zheng Weileng Wang*

Zhejiang Haina Semiconductor Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

Laser micro-nano processing technology, with its unique advantages of high precision, high efficiency and non-contact type, has become an important means in the field of silicon wafer precision processing. The technology makes use of the characteristics of ultra-short pulse laser to realize the preparation of surface microstructure of silicon wafer, microhole drilling, precision cutting and the manufacturing of micro-nano devices, breaking through the bottleneck of precision and function integration of traditional processing methods. However, in the process of laser micro-nano processing, there are still some key problems, such as the difficult control of the thermal influence area, the difficult stable processing accuracy and the single equipment function, which seriously restrict the popularization and application of this technology in industrial production. Therefore, the in-depth study of laser micro-nano processing mechanism, process parameter optimization and integration with automation technology has become an important development direction in the field of silicon wafer processing.

Keywords

laser micro-nano processing; silicon wafer processing; micro-nano structure; ultra-short pulse laser; process optimization

硅片加工中激光微纳加工技术的应用与发展

郑欢欣 王伟棱*

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江 衢州 324300

摘 要

激光微纳加工技术以其高精度、高效率及非接触式的独特优势,成为硅片精密加工领域的重要手段。该技术利用超短脉冲激光的特性,实现硅片表面微结构制备、微孔钻削、精密切割以及微纳器件制造,突破了传统加工方式在精度和功能集成上的瓶颈。然而,激光微纳加工过程中,仍存在热影响区域难以控制、加工精度难以稳定以及设备功能单一等关键问题,严重制约了该技术在工业生产中的推广应用。因此,深入研究激光微纳加工机理、工艺参数优化以及与自动化技术融合已成为硅片加工领域的重要发展方向。

关键词

激光微纳加工; 硅片加工; 微纳结构; 超短脉冲激光; 工艺优化

1 引言

伴随微电子产业及半导体技术的飞速发展,硅片加工工艺对加工精度与微结构复杂性的要求显著提高。传统的机械加工及化学蚀刻方法已难以满足当前高端芯片及微纳器件制造的高精度需求。激光微纳加工技术作为一种全新的非接触加工方法,具备空间分辨率高、能量可控性强和热损伤小的优势,逐渐成为实现硅片精密加工与微结构制造的重要手段。近年来,国内外针对激光微纳加工技术展开了深

入的研究,探索了超短脉冲激光在硅片微纳结构构筑、精密切割与钻孔等方面的应用潜力,初步实现了硅基微纳器件的高效制备。尽管取得一定成果,但在工艺稳定性、设备综合性能及热损伤控制等方面仍存在诸多挑战,亟需开展深入的理论与工艺研究,以推动硅片加工向更高精度、更高效率方向发展。

2 激光微纳加工技术的原理及特点

2.1 激光微纳加工的基本原理

激光微纳加工技术基于激光与材料相互作用的物理机制,通过高能量密度的激光束在极短时间内作用于材料表面,实现材料的去除、改性或重构。超短脉冲激光(如飞秒激光、皮秒激光)因其极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,能够在纳米尺度上精确控制能量沉积,减少热影响区域,从而实现高精度的微纳结构加工。激光与材料的相互作用主要

【作者简介】郑欢欣(1981-),男,中国浙江杭州人,工程师,从事硅材料加工研究。

【通讯作者】王伟棱(1977-),男,中国浙江杭州人,本科,工程师,从事硅材料加工研究。

包括光热效应和光化学效应，前者通过局部加热使材料熔化或蒸发，后者则通过光子能量直接破坏材料化学键，实现非热熔性加工。

2.2 激光微纳加工的技术优势

激光微纳加工技术具有高精度、非接触式加工和广泛适用性等显著优势。其空间分辨率可达亚微米甚至纳米级别，能够满足微电子和半导体领域对高精度加工的需求。非接触式加工避免了机械应力对材料的损伤，特别适用于脆性材料如硅片的加工。此外，激光加工具有高度的灵活性和可控性，能够通过调节激光参数（如波长、脉冲宽度、能量密度）适应不同材料的加工需求，实现复杂微纳结构的高效制备。

2.3 常用激光微纳加工设备及工艺方法

常用的激光微纳加工设备包括飞秒激光加工系统、皮秒激光加工系统以及紫外激光加工系统。飞秒激光因其极短的脉冲宽度和低热效应，广泛应用于高精度微纳结构加工；皮秒激光在加工效率和精度之间取得了良好平衡，适用于大规模生产；紫外激光则因其短波长和高光子能量，适用于高分辨率的光刻和微细加工。工艺方法主要包括激光直写、激光烧蚀、激光诱导表面改性以及激光辅助化学蚀刻等，这些方法在硅片表面微纳结构制备、微孔钻削和精密切割中发挥了重要作用。

3 激光微纳加工技术在硅片加工中的具体应用

3.1 硅片表面微纳结构制备

激光微纳加工技术在硅片表面微纳结构制备中展现了显著优势。通过超短脉冲激光的精确能量控制，可以在硅片表面实现高精度的微纳结构加工，如微槽、微孔、光栅和光子晶体等。这些结构在微电子、光电子和传感器领域具有重要应用价值。例如，在太阳能电池中，利用激光加工制备的表面微纳结构可以显著提高光吸收效率；在微流控芯片中，激光加工的微通道和微腔体能够实现流体的精确操控。激光加工的非接触特性避免了机械应力对硅片的损伤，同时其高分辨率和高灵活性使得复杂微纳结构的高效制备成为可能。此外，激光加工还可以通过多光束干涉或空间光调制技术，实现大面积周期性微纳结构的快速制备，为硅片表面功能化提供了新的技术途径。

3.2 硅基微纳器件制造

激光微纳加工技术在硅基微纳器件制造中发挥了关键作用。通过激光直写和激光诱导表面改性等技术，可以在硅片上直接制备微纳传感器、执行器和光学器件。例如，利用飞秒激光加工技术可以在硅片上制备高精度的微机电系统（MEMS）器件，如加速度计和陀螺仪；在光电子领域，激光加工的光子晶体和波导结构能够实现光信号的精确调控。此外，激光加工还可以与其他工艺（如化学蚀刻和薄膜沉积）结合，实现多功能集成器件的制造。这种技术为硅基微纳器件的高性能化和微型化提供了重要支持。近年来，随着激光

加工精度的不断提高，研究人员成功实现了硅基纳米线、纳米孔和纳米间隙结构的制备，这些结构在纳米电子器件和生物传感器中展现了巨大的应用潜力。

3.3 高效率加工性能，多尺度结构速率与深宽比优化

双激光微纳加工技术通过协同调控不同脉宽激光的能量分配，显著提升了硅片加工效率。飞秒激光负责高精度轮廓加工，纳秒激光进行快速材料去除，两者结合使加工速率较单激光提升 50% 以上。在深宽比控制方面，双激光分步加工策略可实现 10:1 以上的高深宽比结构，同时保持侧壁垂直度误差小于 1°。通过优化激光参数匹配，该技术能在同一工艺中实现微米级粗加工和纳米级精修，兼顾加工速度与精度。动态聚焦系统的引入进一步提高了大尺寸硅片加工的均匀性，使 300mm 晶圆的面内加工一致性达到 $\pm 2\%$ 。能量梯度控制技术有效避免了传统激光加工中常见的锥度问题，通孔结构的孔径偏差可控制在 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内。这种多尺度加工能力使其在 TSV、MEMS 器件等三维结构制造中展现出独特优势。

4 激光微纳加工技术的关键问题及解决策略

4.1 加工精度控制问题及对策

激光微纳加工技术在硅片加工中面临的主要挑战之一是加工精度的控制。由于激光与材料相互作用的复杂性，加工过程中容易受到激光光束质量、聚焦精度、材料特性以及环境因素的影响，导致加工精度难以稳定。例如，激光光束的波动或聚焦位置的微小偏差可能导致加工尺寸的偏差，影响微纳结构的成型质量。为解决这一问题，研究人员提出了多种优化策略。首先，采用高稳定性的激光光源和精密光学系统，确保激光光束的均匀性和聚焦精度；其次，引入实时监测与反馈控制系统，通过在线检测加工过程中的关键参数（如激光能量、焦点位置等），动态调整加工条件，提高加工精度的一致性。此外，结合计算机辅助设计（CAD）和数值模拟技术，优化激光加工路径和参数，减少加工误差。例如，通过有限元分析模拟激光与材料的相互作用，预测加工结果并优化工艺参数，从而实现对加工精度的精确控制。

4.2 热效应与损伤抑制技术

激光微纳加工过程中，热效应是一个难以忽视的问题。尽管超短脉冲激光能够显著减少热影响区域，但在高能量密度或长时间加工条件下，仍可能产生热累积效应，导致材料表面或内部出现热损伤，如微裂纹、熔融层或相变区域。这种热损伤不仅影响加工质量，还可能降低硅片的功能性能。为抑制热效应，研究人员提出了多种技术方案。一种有效的方法是采用飞秒或皮秒激光，利用其极短的脉冲宽度和极高的峰值功率，在热扩散之前完成材料去除，从而最大限度地减少热影响区域。此外，通过优化激光参数（如脉冲能量、重复频率和扫描速度），控制能量沉积速率，避免热累积效应。另一种策略是引入辅助冷却技术，例如在加工过程中使

用气体或液体冷却介质,快速带走热量,降低加工区域的温度。近年来,还有研究提出利用多光子吸收和非线性效应,进一步减少热损伤,提高加工质量。

4.3 微纳尺度加工工艺的稳定性优化方法

在微纳尺度加工中,工艺稳定性是影响加工质量和效率的关键因素。由于加工尺度极小,任何微小的工艺波动都可能导致加工结果的显著偏差。例如,激光能量的微小变化或环境温度波动可能影响加工尺寸和形状的一致性。为提高工艺稳定性,研究人员从多个方面进行了优化。首先,开发高精度的激光加工设备,采用闭环控制系统实时监测和调整激光参数,确保加工条件的稳定性。其次,优化加工环境,例如在真空或惰性气体环境中进行加工,减少外界干扰因素的影响。此外,通过大数据分析和机器学习技术,对加工过程中的海量数据进行处理和分析,建立工艺参数与加工结果之间的映射关系,实现工艺参数的智能优化。例如,利用深度学习算法预测加工结果并自动调整激光参数,提高加工的一致性和可靠性。同时,结合在线检测技术,实时监控加工质量,及时发现并纠正工艺偏差,确保微纳尺度加工的高稳定性和高重复性。

5 激光微纳加工技术的未来发展趋势

5.1 加工技术智能化与自动化发展趋势

激光微纳加工技术的智能化和自动化是未来发展的主要方向。随着人工智能和机器学习技术的快速发展,激光加工设备正逐步向智能化方向迈进。通过引入智能算法,可以实现加工参数的自动优化、加工过程的实时监控以及加工结果的智能预测,从而提高加工精度和效率。例如,基于深度学习的图像识别技术可以实时分析加工表面的形貌特征,自动调整激光参数以适应不同的加工需求。此外,自动化技术的应用使得激光加工设备能够实现无人化操作,大幅提高生产效率并降低人工成本。未来,智能化和自动化技术的深度融合将进一步推动激光微纳加工技术在工业生产中的广泛应用,为硅片加工领域带来革命性变革。

5.2 多功能激光加工设备的集成化趋势

激光微纳加工设备的集成化是满足复杂加工需求的重要趋势。传统的激光加工设备功能单一,难以适应多任务、多工艺的加工场景。未来,激光加工设备将向多功能集成化方向发展,通过整合多种加工模块(如激光切割、钻孔、表面改性等),实现一台设备完成多种加工任务。例如,集成化的激光加工系统可以同时实现硅片的精密切割、微孔钻削和表面微纳结构制备,显著提高加工效率和灵活性。此外,集成化设备还可以结合在线检测和反馈控制功能,实现加工

过程的实时优化,确保加工质量的一致性。这种多功能集成化趋势不仅能够降低设备成本,还能满足高端制造领域对复杂加工工艺的需求。

5.3 与其他新兴技术融合的趋势分析

激光微纳加工技术与其他新兴技术的融合是未来发展的重要方向。例如,与纳米技术的结合可以实现更高精度的微纳结构加工,为纳米电子器件和生物传感器的制造提供技术支持;与3D打印技术的融合可以实现复杂三维微纳结构的高效制备,拓展激光加工的应用范围。此外,激光加工技术与量子技术、光子技术的结合也为新型功能器件的开发提供了新的可能性。例如,利用激光加工制备的量子点阵列和光子晶体结构在量子计算和光通信领域展现了巨大的应用潜力。未来,随着多学科交叉融合的不断深入,激光微纳加工技术将在更多前沿领域发挥重要作用,推动硅片加工技术向更高水平发展。

6 结语

激光微纳加工技术以其高精度、非接触式加工和广泛适用性,在硅片加工领域展现了巨大的应用潜力。通过超短脉冲激光的精确能量控制,该技术成功实现了硅片表面微纳结构制备、微纳器件制造以及精密切割与钻孔,突破了传统加工方式的局限性。然而,加工精度控制、热效应抑制和工艺稳定性优化等问题仍需进一步研究。未来,随着智能化、自动化技术的深度融合以及多功能集成化设备的开发,激光微纳加工技术将朝着更高精度、更高效率的方向发展。同时,与其他新兴技术的结合将进一步拓展其应用领域,为微电子、光电子和半导体产业的创新发展提供强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 黄宸,黄丹丹,王剑,孙业荣,鲍官培.单晶硅片的电化学-固结-游离磨料复合加工表面完整性[J].半导体技术,2024,49(06):549-554+560.
- [2] 张逸民,朱祥龙,董志刚,康仁科,徐嘉慧,张津豪.硅片磨床伺服进给系统仿真模型与分析[J].组合机床与自动化加工技术,2024,(04):102-104+109.
- [3] 闫道恒,牛俊凯,张毅,陈晓强,时云鹏,贺柳青.硅片超精密磨削背面减薄加工试验分析[J].科技视界,2024,14(02):77-80.
- [4] 张立安.超薄单晶硅片加工检测技术的研究进展[J].现代工业经济和信息化,2022,12(09):27-29.
- [5] 郭兵健,刘小磐,徐一俊,黄笑容,吴晓峰,周玲,何国君,蒋委达,梁忠明.浙江中晶科技股份有限公司,单晶硅材料高效绿色加工工艺和全自动加工线的研发及应用[Z].项目立项编号:2018C01076.鉴定单位:浙江省科技厅.鉴定日期:2022-01-01.