

SiC激光剥离设备控制系统设计研究

李晓燕, 张志耀

中国电子科技集团公司第二研究所, 山西 太原

收稿日期: 2025年5月12日; 录用日期: 2025年6月5日; 发布日期: 2025年6月12日

摘要

本文通过分析SiC激光剥离工艺的功能需求, 确定了设备控制系统设计方案及硬件搭建, 软件规划。工控机为主控系统, ACS为运动控制器, 直线电机、伺服电机、DD构成XYZ0四维度激光扫描运动平台; 并通过控制系统验证, 满足了激光剥离工艺要求。

关键词

碳化硅, 激光剥离, 控制系统设计, 工控机

Design and Research of SiC Laser Lift-Off Equipment Control System

Xiaoyan Li, Zhiyao Zhang

The 2nd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

Received: May 12th, 2025; accepted: Jun. 5th 2025; published: Jun. 12th, 2025

Abstract

This paper analyzes the functional requirements of the SiC laser lift-off process, determines the design scheme of the equipment control system and the hardware choice and software planning. The industrial control computer serves as the main control system, with ACS as the motion controller. The linear motor, servo motor, and DD form the XYZ0 four-dimensional laser scanning motion platform. It meets SiC laser lift-off process by verification of the control system.

Keywords

SiC, Laser Lift-Off, Design of Control System, PC

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳化硅(SiC)是第三代半导体材料, SiC 生长形成晶锭, 晶锭切割成为晶片, 随后再经过一系列工序, 最后制成半导体器件。SiC 晶片作为半导体衬底材料, 是晶锭经过切割、研磨、抛光、清洗等工序加工形成的薄片。传统切割工艺是线切割, 但缺点是损耗大, 耗时长; 为了解决线切割工艺的问题, 研发出了激光剥离新工艺[1]。该工艺非接触、损耗小、效率高, 特别适用于大尺寸(8 寸)或超大尺寸(12 寸)碳化硅衬底的量产, 进一步促进了半导体行业的降本增效[2]。

2. 激光剥离工艺流程

SiC 激光剥离工艺是先通过激光聚焦晶锭内部一定切割深度使其扫描改质, 再超声剥离出晶片[3]。具体工艺流程如下:

晶锭吸附 - 自动测高 - 视觉定位 - 提取扫描路径 - 激光工艺参数设置 - 光学整形 - 激光扫描(扫描质量监测) - 晶片剥离。

以 6 寸 SiC 晶锭, 剥离出晶片厚度 350 μm 为例, 激光剥离与线切割技术对比见表 1。

Table 1. Comparison of laser lift-off and wire cutting technology

表 1. 激光剥离与线切割技术对比表

项目	激光剥离	线切割	备注
切割方式	非接触	接触	
切割时间	20 min	4~5 天	
单片损耗	(80~120) μm	(280~300) μm	
晶锭出晶片数	46 片	30 片	晶锭 20 mm 厚

从上表效率、损耗、产出可以看出, 激光剥离工艺的优势显而易见。

SiC 激光剥离设备属于半导体设备, 控制系统是半导体设备的核心, 软件又是基于控制系统硬件开发, 所以控制系统设计至关重要。

3. 工控机的优势

常用的半导体工艺设备控制系统类型: 工控机、PLC 和工控机 + 组合; 工控机 + 可以是运动控制器或 PLC; 选择合适的控制系统, 有助于优化半导体设备性能与成本效益。

工控机是专用于工业控制的计算机, 其优势在于:

- 1) 强大的计算能力, 可以实现数据采集与处理, 并与上层设备进行数据交换;
- 2) 编程灵活, Windows 或 Linux 操作系统, 支持 C++, C#等编程语言, 便于设备软件开发, 同时方便集成第三方软件;
- 3) 通讯接口, USB、串口和网口, 支持 TCP/IP、MODBUS、CAN 等网络协议;
- 4) 扩展性, 通过扩展卡槽, 可以升级或扩展硬件性能。

考虑到工控机的数据处理能力、软件开发、网络通信及扩展性, 激光剥离设备选用工控机作为主控系统, 再选择合适的 CPU、主板、内存、硬盘和接口。

4. 运动控制系统搭建

激光剥离设备中, 激光扫描的快速性和重复性, 要求高速高精度的运动控制系统。

选用工控机作为上位机, ACS 运动控制器作为下位机, 然后通过 EtherCAT 总线连接直线电机、DD、伺服电机和 IO 输入输出, 运动控制系统硬件框图见图 1。

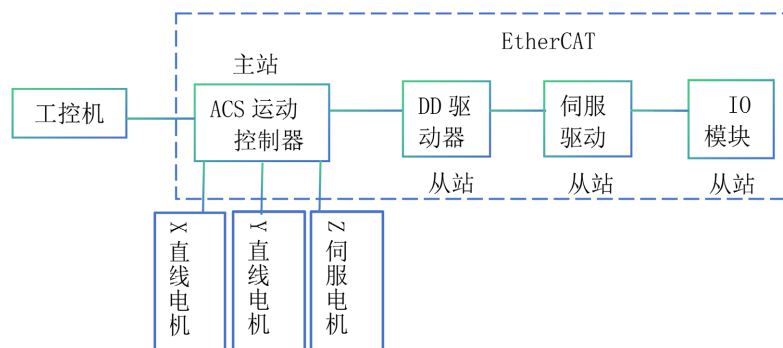


Figure 1. Motion control system diagram
图 1. 运动控制系统框图

激光扫描 XYZ 运动平台采用全闭环控制系统, 由运动控制器、驱动器、电机、检测装置(光栅尺)构成; 激光头安装在 Z 轴上, Z 轴运动由伺服电机加光栅尺实现。

ACS 运动控制器, 驱控一体, 支持 EtherCAT 协议, 是可扩展的多轴运动控制器, 具有强大的运动编程和自整定调试功能, 还拥有 RFR Analyzer 频域分析功能, 能满足苛刻的运动控制性能[4]。激光扫描平台 X 直线电机、Y 直线电机、Z 伺服电机 3 轴运用 ACS 驱控一体, DD、传输伺服电机走 EtherCAT 总线。当然, 需要选用支持 EtherCAT 协议的 DD 驱动器、伺服驱动器、IO 模块。

直线电机由于取消了中间传动部件, 使运动平台结构简化, 与传统伺服电机相比, 具有更高的定位精度和动态性能。鉴于此, 把直线电机作为激光剥离设备 XY 运动平台执行机构; 运动平台的旋转功能则选用 DD 马达。

5. 激光剥离控制系统硬件设计

激光剥离控制系统按功能划分, 包括运动控制系统, 激光扫描系统, 光学调制系统, 视觉定位系统及 IO 输入输出等。激光剥离控制系统的性能直接决定了激光扫描的精度、稳定性和效率。

5.1. 运动控制系统

运动控制系统完成激光扫描及路径规划、激光头的升降, 确保激光束按路径扫描待加工晶锭。

晶锭通过负压吸附在 XY 直线电机运动平台, 选用位移传感器实现晶锭自动测高; 压电控制器实现激光扫描过程中微米级高度微调, 补偿晶锭表面高度误差。

5.2. 激光扫描及光学调制系统

激光扫描系统根据不同的加工需求调整激光工艺参数(脉宽、功率等)实现晶锭切割、工艺优化。

光学调制系统由透镜、反射镜、扩束镜和空间光调制器等组成, 用于聚焦和控制激光光束的路径。激光扫描与光学调制的结合, 有效提升了激光扫描的质量和一致性。

5.3. 视觉定位系统

视觉定位系统由相机、镜头、光源、光源控制器组成，其功能如下：

- 1) 视觉自动识别晶锭外形轮廓，计算出扫描位置及路径。
- 2) 激光扫描效果实时监测。

5.4. IO 输入输出

IO 输入输出部分完成输入信号采集和输出信号处理，输入信号有传感器，开关，气压监测等；输出信号有电磁阀，信号灯等。统计设备输入输出点数，加一定余量选定输入输出模块。

6. 激光剥离控制系统软件规划

工控机作为上位机，软件采用 C# 编程；ACS 控制器作为下位机；编程采用 ACS 编程语言。上位负责数据存储调用、自动化生产管理以及通信，而高速高精度运动控制由下位编程实现。

6.1. 工控机软件设计

工控机软件采用模块化设计，包括界面交互、视觉定位、工艺参数配方、扫描文件调用；而激光器软件、光学调制软件通过通讯集成入设备软件整体。工控机软件示意图见图 2。

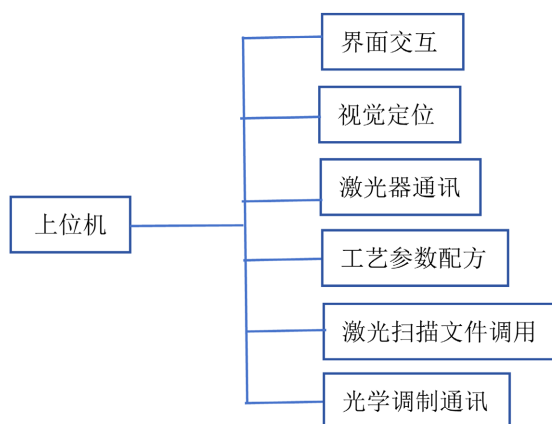


Figure 2. The diagram of industrial control computer software module
图 2. 工控机软件模块框图

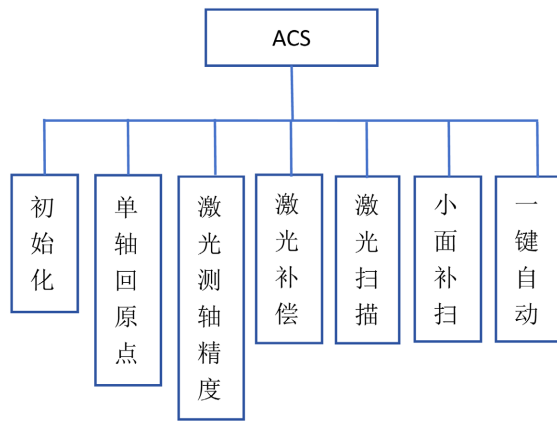
界面交互完成用户权限管理和激光剥离工艺的加工生产及监控，视觉定位实现图形采集和数据处理，工艺参数配方完成历史工艺参数的存储和调用，扫描文件调用则是输出激光扫描坐标给运动控制器。

6.2. ACS 软件设计

ACS 软件包括运动轴参数配置和运动程序两部分。

运动轴参数有，轴结构、电机参数、编码器参数、安全保护参数等；参数设置完成后，电流环、速度环、位置环自动调谐，如果不满足使用要求，再手动微调。同时，可以运用 RFR Analyzer 频域分析工具，识别和评估运动轴的动态性能。

运动程序保存在 Buffer 里，除了 D-Buffer 用于声明全局变量外，各 Buffer 之间没有主次之分，可以相互调用，Buffer 数量根据实际需要选择。ACS 软件示意图见图 3，控制器循环周期内 32 个 Buffer 并行运行。



注：激光测轴精度和激光补偿，此处激光指激光干涉仪；激光扫描，这里激光指激光器。

Figure 3. The diagram of ACS software module
图 3. ACS 软件模块框图

激光剥离控制系统硬件设计，软件加持，实现了生产管理和监控，能识别潜在故障并预警，确保 SiC 激光剥离工艺的一致性。

7. 控制效果及工艺验证

7.1. 控制系统验证

激光扫描时，运动轴 Z 先到达扫描高度，扫描弓形路径由运动轴 X 和 Y 完成。通过运动平台调试，激光干涉仪测量精度，再经过软件分段补偿[5]，激光干涉仪再次实测 X 轴、Y 轴精度见图 4、图 5。

从下图可以看出，运动平台实测精度见表 2。

7.2. 激光剥离工艺验证

SiC 激光剥离设备成功应用于半导体产线中，待剥离 SiC 晶锭及加工晶片见图 6，满足了激光剥离工艺要求。

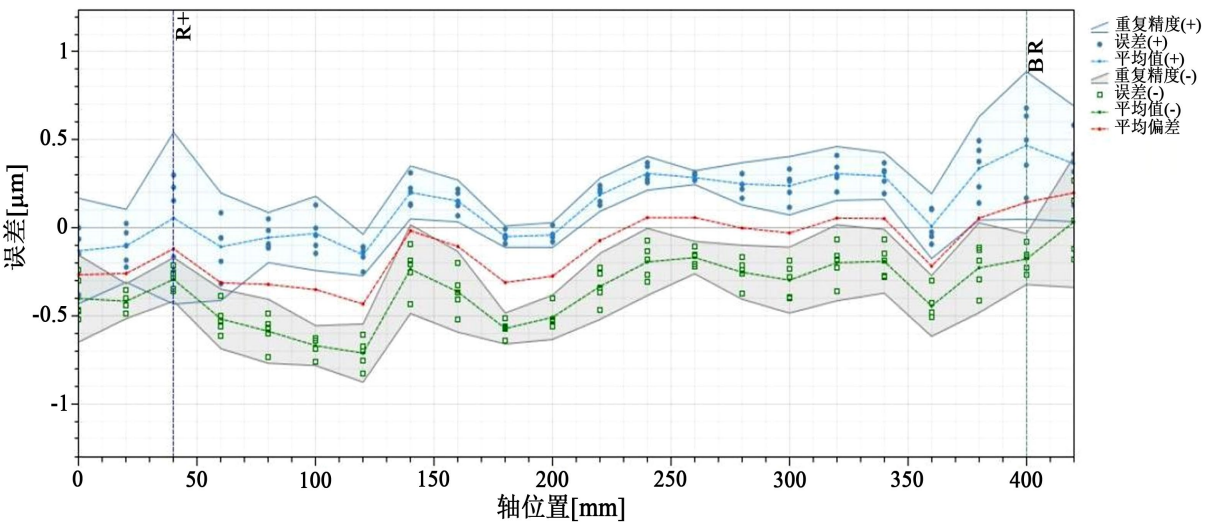


Figure 4. The diagram of X-axis actual measurement accuracy
图 4. X 轴实测精度

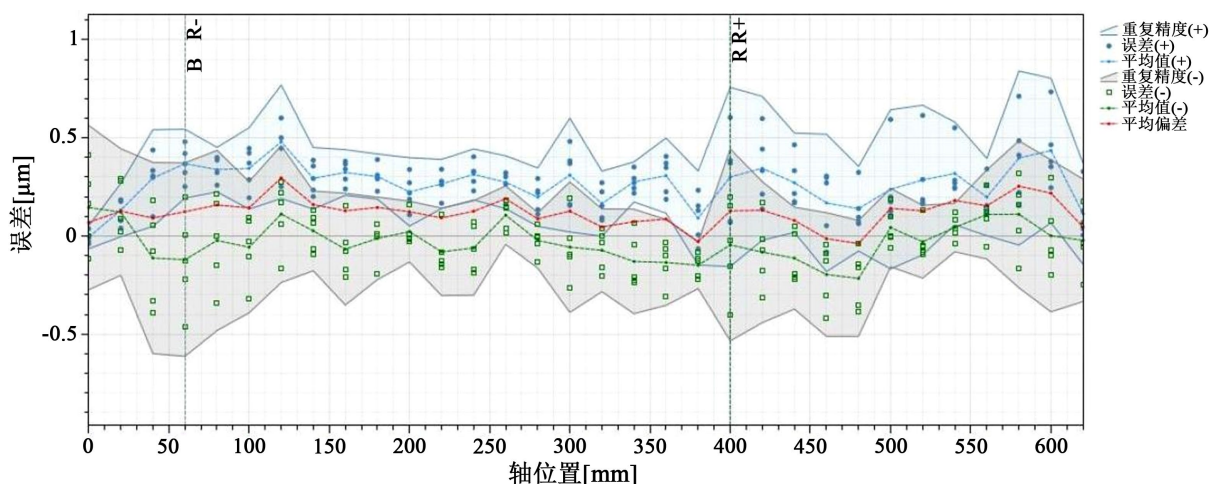


Figure 5. The diagram of Y-axis actual measurement accuracy

图 5. Y 轴实测精度

Table 2. The actual measurement accuracy of motion platform

表 2. 运动平台实测精度表

轴名称	行程	定位精度	重复定位精度	最大扫描运行速度
X 轴直线电机	410 mm	1.8 μm	1.2 μm	2000 mm/s
Y 轴直线电机	610 mm	1.5 μm	1.3 μm	500 mm/s

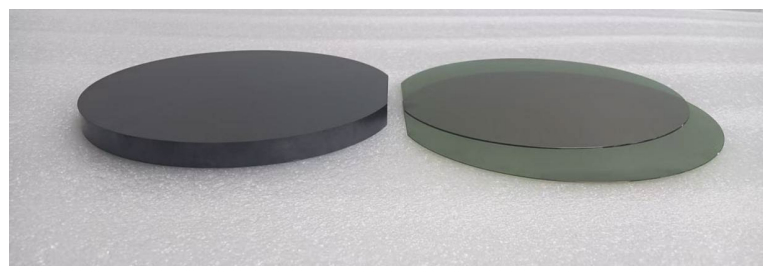


Figure 6. SiC ignot and laser lift-off wafer

图 6. SiC 晶锭及剥离出的晶片

8. 结束语

SiC 激光剥离设备控制系统采用工控机 + ACS 运动控制器, 集成了运动控制、视觉、激光, 光学等分系统, 实现了 SiC 晶锭到晶片的激光剥离。现 SiC 激光剥离已应用于 SiC 激光剥离工艺正式生产中, 为客户提高了生产效率, 降低了损耗。该控制系统长期运行稳定, 可以扩展到半导体其他设备控制系统研发设计中。

参考文献

- [1] 张志耀, 等. SiC 激光改质剥离工艺材料损耗控制技术[J]. 电子工业专用设备, 2023(3): 22-25.
- [2] 娄艳芳, 等. 8 英寸导电型 4H-SiC 单晶衬底制备与表征[J]. 人工晶体学报, 2022, 51(9-10): 1745-1748.
- [3] 胡北辰, 等. SiC 单晶材料的激光剥离技术研究进展[J]. 电子工艺技术, 2022(4): 192-195+222.
- [4] 张永昊, 等. 基于 ACS 运动控制器的 LED 晶片分选机控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2021(5): 116-121.
- [5] 王瑞亭, 等. AOI 检测设备的直线电机定位精度补偿研究[J]. 机械研究与应用, 2018(5): 145-147.