

Design and Application of Semiconductor Silicon Wafer Defect Detection System Based on Machine Vision

Feng Chen Xingqun Fu Zheng Wang

Zhejiang Zhongjing Electronics Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324000, China

Abstract

This paper introduces the design and application of a semiconductor silicon wafer surface defect detection system based on machine vision. The system is composed of automatic loading and unloading actuator, light source, optical lens, industrial camera, image acquisition system and image analysis and processing system. In terms of automatic loading and unloading system, the automatic loading and unloading of multi-specification monocrystalline silicon wafer is realized, including the design and manufacture of traceless suction cups to meet the requirements of clean environment, as well as the clever implementation of electrical system architecture. In the defect detection system of monocrystalline silicon wafer, multiple sets of visual imaging systems are used to realize image acquisition, and various defect detection algorithms are developed. The application of this system can improve the level of production automation, reduce the production cost, improve the quality of product testing, and have good social and economic benefits.

Keywords

machine vision; semiconductor silicon wafer; defect detection system; optical application; defect detection algorithm

基于机器视觉的半导体硅片缺陷检测系统设计与应用

陈锋 傅兴群 汪征

浙江众晶电子有限公司, 中国 · 浙江 衢州 324000

摘 要

论文介绍了一种基于机器视觉的半导体硅片表面缺陷检测系统的设计与应用。该系统采用自动上下料执行机构、光源、光学镜头、工业相机、图像采集系统和图像分析处理系统构成。在半导体硅片自动化上下料系统方面,实现了多规格单晶硅片的自动上下料,包括设计和制造无痕吸盘以满足洁净环境的要求,以及电气系统架构的巧妙实现。在单晶硅片缺陷检测系统方面,采用多套视觉成像系统实现图像采集,并开发了多种缺陷检测算法。该系统的应用可提高生产自动化水平,降低生产成本,提高产品检测质量,具有良好的社会和经济效益。

关键词

机器视觉; 半导体硅片; 缺陷检测系统; 光学应用; 缺陷检测算法

1 引言

单晶硅片, 硅的单晶体, 是一种具有基本完整的点阵结构的晶体, 由高纯度的多晶硅在单晶炉内拉制而成。不同的方向具有不同的性质, 是一种良好的半导体材料。其纯度要求达到 99.9999%, 甚至达到 99.9999999% 以上。由于其卓越的电学性能和光学特性, 单晶硅片被广泛应用于太阳能电池、半导体器件、IC 芯片等行业。在国内的单晶硅片的生产过程中, 由于生产技术的限制, 部分成品的单晶硅片上存在着一些微小的瑕疵, 这些瑕疵会大幅缩短终端产品的使用寿命^[1]。这些缺陷可能由于生产环境、设备故障或其他因素引起, 对产品的质量和性能产生负面影响。目前, 国内

各单晶硅片生产企业普遍采用人工肉眼检测的方式, 来对成品进行质量把控。然而, 这种传统的人工检测方式存在一定的局限性, 人工检测受到主观因素的影响, 不同操作者的主观判断标准可能存在差异, 容易导致质量把控的不一致性; 人工检测速度相对较慢, 不能满足大规模生产的需求, 且劳动强度较大; 对于微弱缺陷的检测精度相对较低, 容易出现漏检或误检情况^[2]。为解决上述问题, 本项目提出了基于机器视觉的半导体硅片表面缺陷检测系统的设计与应用。通过引入先进的机器视觉技术, 该系统能够高效、准确地对单晶硅片进行缺陷检测, 实现自动上下料功能, 替代传统的人工检测方式。这不仅能够降低劳动强度、生产成本, 减少人为因素对产品检测过程的影响, 还能够实现产品生产的高度自动化, 提高产品检测质量, 为半导体硅片行业带来显著的社会和经济效益。

【作者简介】陈锋(1972-), 男, 中国浙江开化人, 工程师, 从事机电一体化研究。

2 系统设计与构成

2.1 自动上下料系统设计

自动上下料系统是半导体硅片生产中至关重要的一部分，其设计需要考虑生产环境的洁净度、硅片的规格差异以及高效稳定的操作。该系统主要包括无痕吸盘设计与制造、单晶硅片上下料及分拣机构以及整体电气系统架构。

在无痕吸盘的设计与制造方面，由于单晶硅片的生产工艺对环境洁净度要求极高，吸盘在吸附单晶硅片的过程中不能留下任何痕迹。国际标准要求单晶硅片料盒硅片与硅片之间的间距小于 4mm，而市面上现有的无痕吸盘无法满足这一要求。因此，采用自主研发的方式，通过改进吸附材料和工艺，确保吸盘在工作过程中对单晶硅片不会造成任何污染。

单晶硅片上下料及分拣机构是自动上下料系统的核心。为实现对不同规格的单晶硅片进行自动上下料，需要设计机构能够适应 3 英寸、4 英寸、5 英寸和 6 英寸四种规格的硅片。这需要考虑机械结构的灵活性和智能控制系统的精准度。为了避免对洁净房内空气造成不必要的污染，整个设备在设计过程中需要考虑降低起尘量，特别是在运行过程中对环境的影响。

在整体电气系统架构方面，采用了 PLC 控制系统作为核心，集成多轴伺服控制系统，以实现快速精准定位控制。使用触摸屏（HMI）进行设备监视和及时定位设备故障。通过采用通信强大的 PLC，实现了上位机、工业相机系统和设备运行系统的实时数据交互。各个部件的实时通讯和独立数据交换确保了设备的高效运行。

2.2 单晶硅片缺陷检测系统设计

单晶硅片缺陷检测系统的设计涵盖了光学应用、缺陷检测算法开发以及硅片定位算法的三个关键方面，旨在通过综合运用先进技术来提高对单晶硅片表面缺陷的检测精度和效率。

在光学应用方面，系统采用多套视觉成像系统的组合，致力于实现对单晶硅片表面的高精度图像采集。这些视觉系统具有采样精度高、采样速度快、图像质量稳定等特点，为后续缺陷检测提供了高质量的数据基础。通过多套系统的协同工作，能够全面而迅速地捕捉单晶硅片表面的特征，为后续算法处理提供丰富的信息。

在缺陷检测算法开发方面，系统面临多种缺陷的检测和识别任务，包括脏污、崩边、划道、磨印、孔洞、LD 以及不规则圆等。为解决这些复杂的问题，采用了不同的算法进行处理。以粗糙表面低对比度缺陷为例，系统成功完成了对纹理特征明显的硅片表面低对比度细长状划痕类缺陷的准确提取和分析。这意味着系统在面对复杂的表面特征时，能够快速而精准地识别潜在缺陷，为后续的定位和分类提供了有力支持。

硅片定位算法的开发则旨在对多个尺度及外形的硅片

实现精确定位，以保证严格的缺陷检测边界和区域。这对于后续崩边及边缘 LD 缺陷类的准确检测至关重要。系统采用了高精度卡尺算法，通过对合格硅片的几何边界进行准确定位，并实现对其中不规则圆边界的检测。这一算法的运用有效地解决了不同尺寸和形状硅片的精确定位问题，为后续缺陷检测提供了可靠的基础。

2.3 单晶硅片缺陷检测上位机监控系统

单晶硅片缺陷检测上位机监控系统是整个系统的智能化管理中枢。图像采集系统和数据处理单元是系统的基础，采用了高精度缺陷检测算法。通过对硬件设备正反面大面积相机的实时数据采集，与 PLC 基于 MODBUS 的实时通讯，实现对生产线上硅片生产质量的自动化检测与分类^[3]。

为了提供用户友好的体验，设计了优异的用户交互功能模块。这包括两种图像显示模式的选择，即原图像模式和经算法处理后的效果图模式。用户可以直观地监视设备运行状态、检测结果，并在必要时进行反馈和报警。系统还实现了差异性权限管理，分为普通操作员、技术管理员和系统管理员三个级别，以便更好地控制对系统的访问和配置。

3 系统性能与效益

3.1 系统性能评估

表 1~ 表 3 展示了自动上下料系统、光学系统和硅片表面缺陷检测算法的关键技术指标及性能数据。

表 1 自动上下料系统性能评估

技术指标	数据
具备自动化上下料及自动分拣能力	是
设备检测节拍	7.5 秒 /PIC
设备连续无故障运行时间	30 天
满足单晶硅片无痕取放料的技术要求	是
设备维护简单方便的提醒	是
设备运行安全可靠，效率领先	是

表 2 光学系统性能评估

技术指标	数据
2500W 像素高清图的图像采集	是
硅片表面缺陷的一次性快速成像	是
对环境光的抗干扰与图像稳定性	是
关键部件可更换性	是
设备具备后续升级的可行性	是

表 3 硅片表面缺陷检测算法性能评估

技术指标	数据
具备缺陷类型初步分拣功能	是
实现缺陷结果数据的输出和位置标记	是
实现低对比度缺陷的有效无误检测	是
缺陷检出率	99.50%
缺陷错检率	9% 以内

自动上下料系统表现出色，具备高效的自动化上下料

及分拣能力，节拍快，连续运行时间长，同时满足了对单晶硅片无痕取放料的技术要求，设备维护简便，运行安全可靠，效率行业领先。

光学系统的 2500W 像素高清图片采集、一次性快速成像和对环境光的抗干扰表现出色，关键部件可更换，具备后续升级的可行性，保障了系统的稳定性和可维护性。

硅片表面缺陷检测算法达到了较高的性能水平，实现了缺陷类型初步分拣功能，输出和位置标记缺陷结果数据，并具备对低对比度缺陷的有效无误检测。检出率达到 99.5%，错检率控制在 9% 以内，表现出优异的缺陷检测准确性。

3.2 系统效益分析

3.2.1 经济效益分析

根据市场销售情况的测算，该半导体硅片缺陷检测系统的具体盈利预测如表 4 所示。

表 4 具体盈利预测（万元）

项目	2024 年	2025 年	2026 年	2027 年
年销售量（套）	30	60	80	120
产品销售收入	1350	2580	3200	4800
销售税金及附加	27.54	52.632	65.28	97.92
总成本费用	1066.293	2052.887	2652.618	3935.898
利润总额	256.167	474.481	482.102	766.182
所得税	38.425	71.172	72.315	114.927
净利润	217.742	403.309	409.786	651.254

3.2.2 社会效益

该半导体硅片缺陷检测系统的成功研制将对我国半导体硅片缺陷检测设备的长期依赖进口产生深远的影响，为我国相关产业带来了一项重要的技术进展。目前该设备的单台价格达数百万元人民币以上，而本项目的成功研发将改变这一局面，使我国能够自主生产这类设备，降低相关产业的成本。

该技术不仅可应用于半导体硅片表面缺陷检测，还可在玻璃表面缺陷检测、镀锌件表面缺陷检测等领域发挥作用，拓展了技术的应用范围。由于半导体硅片的缺陷带来的

损失每年高达 1000 万美金左右，因此该系统的应用将在多个产业领域带来显著的社会效益。

3.2.3 技术应用和产业化前景

随着半导体硅片制造工艺的升级，本项目提供的半导体硅片缺陷检测系统具有重要意义。其在尺寸测量、隐裂检测、孔洞检测和脏污检测等方面的应用，有望降低生产过程中的碎片率，提高产品的使用寿命。据估计，半导体硅片的缺陷每年带来的损失高达 1000 万美金左右。

有效的缺陷检测方法对提高半导体硅片的工艺质量至关重要。由于生产规模的扩大和生产线运行速度的提升，人工检测已无法满足现代大工业生产的速度要求。本项目的自动上下料系统、光学系统和缺陷检测算法的协作，实现了对半导体硅片各类缺陷的快速、高精度、实时的检测，为企业节省劳动力、降低成本、提高产品质量提供了有力的支持。

4 结语

综合考虑本项目的设计与应用，基于机器视觉的半导体硅片缺陷检测系统的成功研发在提高半导体硅片生产效率、降低生产成本、改善产品质量等方面具有显著意义。自动上下料系统的实现代表了生产流程的智能化和自动化，有效减轻了劳动强度，提高了生产线的稳定性。而缺陷检测系统的多层次算法确保了对单晶硅片各类缺陷的高效检测，为产品质量控制提供了可靠保障。上位机监控系统则通过实时数据采集和多线程处理，使生产过程得以全面监控和灵活掌控。本项目的成功研发不仅在技术水平上具有重大突破，更在推动半导体产业升级、提升我国相关领域的国际竞争力方面发挥了关键作用。

参考文献

[1] 杨利,陈柳松,谢永超.基于机器视觉的芯片引脚缺陷检测系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2021(5).

[2] 孙贺,刘胜波,冷于浩,等.基于机器视觉的轮胎表面缺陷检测系统的研究与应用[J].工业控制计算机,2022(3).

[3] 钟飞,赵子丹,夏军勇,等.基于机器视觉的编织袋表面缺陷检测系统设计与实现[J].包装工程,2022(5):247-256.