

현장 신뢰성 향상을 위한 심각도 추정 · 인과 분석 통합 기반 웨이퍼 결함 분석 및 자연어 리포트 생성

김서현, 박현희*
명지대학교 인공지능융합학과
seohy2on, hhpark* @ mju.ac.kr

Wafer Defect Analysis and NL Report Generation Based on Integrated Severity Estimation and Causal Analysis for On-Site Reliability

Seohyeon Kim, Hyunhee Park*
Dept. of Artificial Intelligence Convergence, Myongji University

요약

반도체 제조 공정에서 웨이퍼 결함의 신속하고 정확한 분석은 수율 및 제품 신뢰성에 직결된다. 미세 결함은 제품 성능에 치명적이지만, 기존 검사 방법은 탐지 및 분류 정확도에 한계가 있다. 본 논문에서는 실제 현장에서 결함 판별이 어려운 점을 해결하기 위해, Mask2Former 기반의 픽셀 단위 세그멘테이션을 통한 결함 탐지를 수행한다. 나아가, 심각도 정량화 모델링과 통계적 패턴 분석을 통한 인과적 편향 분석을 통합하여, 근거 중심의 자연어 리포트를 생성한다. 이를 통해 해석 가능성과 신뢰성을 높이는 통합형 결함 분석 시스템을 제안한다.

I. 소개

반도체 제조 공장에서 웨이퍼 결함은 제조 경쟁력 확보에 중요한 요인이다. 이를 효과적으로 탐지하고 분석하는 것은 현대 반도체 산업의 경쟁력 확보에 필수적이다.

웨이브릿 변환, 공간 필터링, KNN 등 기존의 웨이퍼 결함 분석 방법들은 복잡한 배경 노이즈와 미세한 결함 간의 구별에서 탐지 성능이 낮았다[1]. 특히 서로 다른 결함 유형들이 유사한 특성을 보이는 경우 분류 성능이 매우 저하되었다. 또한, 대부분의 기존 연구는 탐지 및 분류에 치중했고, 원인과 공정의 상관관계 분석은 수동으로 이루어졌다. 이와 더불어, 딥러닝 모델의 특성으로 인해 분석 결과에 대한 신뢰성과 설명 가능성이 부족하였다.

기존 연구들의 한계점을 해결하기 위해, 본 논문에서는 웨이퍼 결함 분석 시스템을 제안한다. 이는 딥러닝 기반의 정밀 결함 탐지, 회귀 모델 기반의 심각도 추정, 그리고 통계적 패턴 분석을 통한 인과 관계 추론을 통합한 웨이퍼 결함 분석 시스템이다. 또한, 분석된 데이터를 기반으로 근거 중심의 자연어 리포트를 생성한다. 이를 통해 신뢰성을 높이며, 웨이퍼 상태를 직관적으로 이해하고 신속하게 의사결정을 내릴 수 있도록 한다.

II. 시스템 아키텍처

본 논문에서 제안하는 웨이퍼 결함 분석 시스템은 다섯 모듈(탐지, 기하학 정보 추출, 심각도 추정, 인과

분석, 리포트 생성)로 구성된다. 각 모듈은 독립적으로 동작하면서도 상호 연동하여 결함을 종합적으로 분석한다.

데이터셋 및 전처리 본 논문에서는 WM811K 웨이퍼 맵 데이터셋을 사용한다. 전체 데이터셋 중 'Edge-Loc', 'Loc', 'Scratch' 세 가지 결함 클래스를 선별하여 실험을 진행한다. 'Scratch' 클래스의 경우 다른 두 클래스에 비해 상대적으로 적은 샘플 수를 보여 데이터 불균형 문제를 해결하기 위해 데이터 증강 기법을 적용한다.

딥러닝 기반 결함 탐지 모듈 결함 탐지의 정확도 향상을 위해 Mask2Former[2] 아키텍처를 활용한 픽셀 단위 세그멘테이션 모델을 구현한다. Mask2Former는 범용 세그멘테이션 아키텍처로, 픽셀 단위에서 객체와 영역을 정밀하게 구분할 수 있다. 학습된 모델을 활용하여 웨이퍼 이미지의 각 픽셀을 분석하고 결함 영역을 탐지한다.

웨이퍼 이미지의 특성상 주기적 패턴과 미세 결함이 겹쳐 보이기 때문에, 딥러닝 모델만으로는 탐지 성능이 제한될 수 있다. 이를 보완하기 위해, 색상 분석을 적용한다. 넓은 영역에 걸쳐 나타나는 결함의 경우 노란색 계열의 색상 특성을 활용하여 탐지 알고리즘을 구현한다. 또한, 미세한 결함에 대해서는 밝기 대비 분석, 경계선 검출 등의 기법을 적용하여 탐지 성능을 향상시킨다.

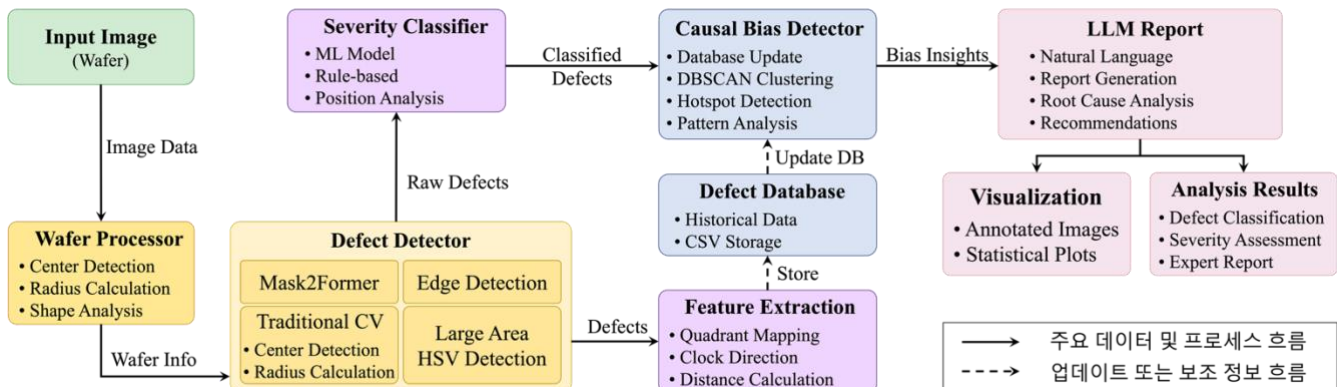


그림 1. 웨이퍼 결함 분석 시스템 아키텍처

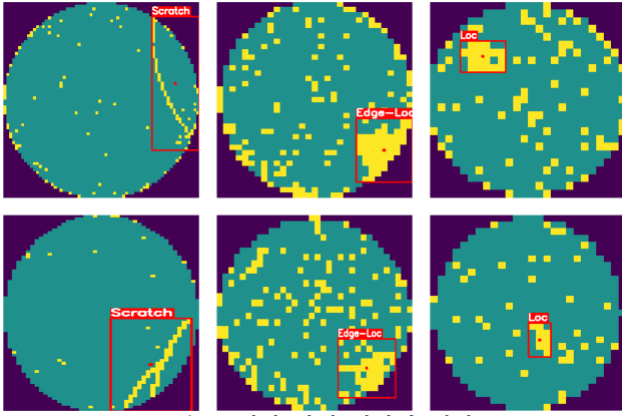


그림 2. 결함 탐지 시각화 예시

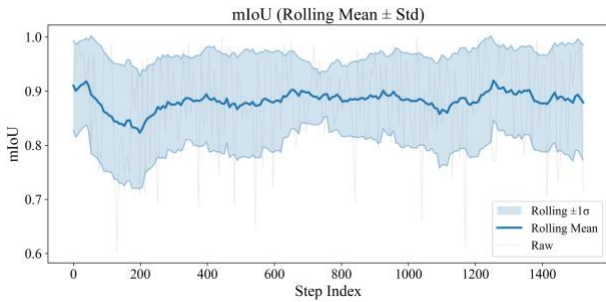


그림 3. Mask2Former 학습 과정별 mIoU 성능 변화

그림 3은 Mask2Former 기반 세그멘테이션 모델의 학습 과정에서 mIoU(mean Intersection over Union) 지표의 변화를 보여준다. 초기 100 스텝에서 급격한 성능 향상을 보인 후, 200-300 스텝 구간에서 일시적인 성능 변동이 관찰되었다. 그러나, 400 스텝 이후부터는 안정적으로 수렴하는 양상을 나타내며, 최종적으로 0.94의 mIoU 값을 달성하였다. 이는 웨이퍼 결함 영역과 정상 영역을 정밀하게 구분할 수 있음을 보여주며, 후속 모듈인 기하학적 특성 분석과 심각도 추정 정확도 향상에 직접적으로 기여한다.

웨이퍼 기하학적 특성 분석 웨이퍼의 중심점과 반지름을 자동으로 추출하는 알고리즘을 포함한다. 이는 허프 변환(Hough Transform)과 원 검출 알고리즘을 기반으로 구현한다. 탐지된 결함이 웨이퍼의 중심부와 가장자리 중 어디에 위치하는지를 정확히 판단할 수 있게 한다. 이러한 위치 정보는 심각도 추정과 인과 관계 분석에서 중요한 특징으로 활용된다.

회귀 모델 기반 심각도 추정 탐지된 결함의 심각도를 추정하는 회귀 모델을 구현한다. 결함의 면적, 웨이퍼 중심에서의 거리, 가장자리 근접성 등 다양한 수치적 특징을 추출하고, 이를 바탕으로 머신러닝 회귀 모델을 학습한다. 모델 학습 과정에서 결함 특징과 실제 심각도 점수 간의 상관관계를 학습하여, 신규 결함에 대한 심각도를 자동으로 예측할 수 있다. 예측된 점수는 1(낮음), 2(중간), 3(높음)의 3단계 등급으로 분류되어 우선순위를 쉽게 판단할 수 있도록 한다. 심각도 추정을 통해 결함의 정량적 위험도를 평가함으로써 생산 라인의 의사결정의 우선순위를 직접 지원한다.

통계적 패턴 분석을 위한 인과적 편향 탐지 누적된 웨이퍼 결함 데이터를 분석하여 시스템적 편향과 공정상의 근본적 문제를 식별한다. 모든 분석 결과는 CSV 형태로 축적되며, 결함들의 정규화된 위치 좌표를 DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise) 알고리즘을 통해 분석한다.

따라서 특정 위치에 결함이 비정상적으로 집중되는 ‘핫스팟(Hotspot)’ 영역을 자동으로 탐지하고, 해당 영역과 관련된 경고 메시지를 생성한다.

자연어 리포트 생성 각 분석 모듈에서 생성된 결함 종류, 위치, 심각도, 편향 분석 결과 등을 종합하여 근거 기반의 해석 가능한 보고서를 생성한다. 본 논문에서는 경량 LLM인 TinyLlama[3]를 활용하여 결함의 위치(사분면, 시계 방향), 인과적 특성 등 핵심 정보를 바탕으로 신뢰성 높은 리포트를 생성한다. 그 결과, 설명 가능성(Explainability)과 실용성을 동시에 확보한다.

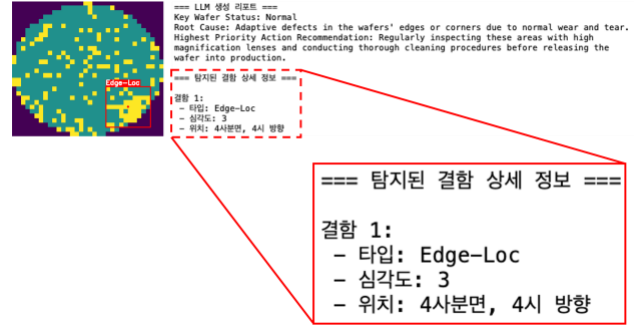


그림 4. 자연어 리포트 생성 예시

III. 결론

본 논문에서는 반도체 제조 현장의 신뢰성 향상을 위한 통합형 웨이퍼 결함 분석 시스템을 제안하였다. Mask2Former 기반의 세그멘테이션을 활용한 결함 탐지, 회귀 모델을 활용한 심각도 추정, DBSCAN 알고리즘을 이용한 패턴 기반 인과적 편향 분석을 통합하여 종합적인 웨이퍼 결함 탐지 분석 시스템을 구현하였다.

본 시스템은 단일 목적 탐지의 한계를 넘어, 탐지부터 심각도 추정 및 분석, 리포트 생성까지의 통합 과정을 구현한다. 이를 통해 반도체 제조 현장에서의 불량률 감소와 공정 최적화에 기여할 것으로 기대한다. 향후 연구에서는 더 다양한 결함 유형에 대한 확장 및 실시간 분석 성능 최적화를 통해 실제 생산 라인에 적용 가능한 수준으로 발전시킬 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단과 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C2005705, 분산 머신러닝 기반 지능형 플라이 기지국을 위한 AI-MAC 프로토콜, RS-2025-02217793, 제습모듈을 내장한 웨이퍼 이송장비 및 편축보정기술개발과 딥러닝을 활용한 광학문자인식 및 Chipping 검출을 포함한 하이브리드 검사장비 기술 개발)

참고 문헌

- [1] Jianhong Ma, Tao Zhang, Cong Yang, Yangjie Cao, Lipeng Xie, Hui Tian, and Xuexiang Li. "Review of Wafer Surface Defect Detection Methods." *Electronics*, vol.12, no.8, Apr.2023, doi:10.3390/electronics12081787.
- [2] Bowen Cheng, Ishan Misra, Alexander G. Schwing, Alexander Kirillov, and Rohit Girdhar. "Masked-attention Mask Transformer for Universal Image Segmentation." arXiv preprint arXiv:2112.01527 (2021).
- [3] Peiyuan Zhang, Guangtao Zeng, Tianduo Wang, and Wei Lu. "TinyLlama: An Open-Source Small Language Model." arXiv preprint arXiv:2401.02385 (2024).