

가변 Threshold를 이용한 Wafer Align Mark 중점 검출 정밀도 향상 연구

김현규* · 이학준* · 박재현**

**한국생산기술연구원 스마트생산시스템연구부

A Study on Improving the Accuracy of Wafer Align Mark Center Detection Using Variable Thresholds

Hyeon Gyu Kim*, Hak Jun Lee* and Jaehyun Park**

**Smart Manufacturing System R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

Precision manufacturing technology is rapidly developing due to the extreme miniaturization of semiconductor processes to comply with Moore's Law. Accurate and precise alignment, which is one of the key elements of the semiconductor pre-process and post-process, is very important in the semiconductor process. The center detection of wafer align marks plays a key role in improving yield by reducing defects and research on accurate detection methods for this is necessary. Methods for accurate alignment using traditional image sensors can cause problems due to changes in image brightness and noise. To solve this problem, engineers must go directly into the line and perform maintenance work. This paper emphasizes that the development of AI technology can provide innovative solutions in the semiconductor process as high-resolution image and image processing technology also develops. This study proposes a new wafer center detection method through variable thresholding. And this study introduces a method for detecting the center that is less sensitive to the brightness of LEDs by utilizing a high-performance object detection model such as YOLOv8 without relying on existing algorithms. Through this, we aim to enable precise wafer focus detection using artificial intelligence.

Key Words : Align mark, Threshold, AI, Image, ROI

1. 서 론

무어의 법칙에 맞춰 반도체 전공정의 극단적인 미세선 단화가 진행되면서 반도체 정밀생산기술 또한 급속도로 발전하고 있는 추세이다. 이에 반도체 전공정과 후공정에서 공정장비와 반도체 웨이퍼 간의 정확하고 정밀한 align은 공정의 정상적인 진행에 있어 핵심적인 요소이다. 그중에 웨이퍼 align mark의 정밀한 중점 검출은 웨이퍼 misalign으로 인한 결함을 감소시켜 수율을 확보하는데 있

어서 결정적인 역할을 하기 때문에 연구가 필요하다[1].

반도체 공정에서 정확한 align을 위해서는 이미지 센서를 통한 계측을 통해 현재 위치를 파악한 뒤 원하는 위치와의 오차를 줄이는 방향으로 제어하는 것이 일반적이다 [2]. 장비 내 LED 밝기는 이미지 처리 과정에서 그레이 레벨에 가장 큰 영향을 주는 요소인데 노후화로 인해 LED가 고장나거나 밝기가 감소하는 등의 문제가 자주 발생한다. 이미지를 기반으로 계측, 검사하는 공정에서 이미지의 밝기 변화와 노이즈는 밝기 히스토그램이 넓게 분포하게 되어 불량 판단에 오류를 발생하게 할 수 있는 원인 중 하나로 꼽힌다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는

†E-mail: jh8145@kitech.re.kr

엔지니어가 직접 라인에 들어가서 장비를 보전해야 하므로 많은 인력과 시간이 소모된다[3].

한편 인공지능 (AI) 기술이 발전하면서 고해상도 이미지 및 영상 처리 기술은 제품의 불량을 판별하거나 이미지 처리를 통한 계측으로 공정 효율을 향상시키는데 있어서 혁신적인 해결책을 제공하고 있다[4].

본 논문은 웨이퍼 중점 검출의 정밀도 향상을 위해 새로운 방법을 제시한다. 기존의 웨이퍼 align mark 중점 검출 방법은 이진화 이후 mark의 기하학적 특징을 이용한 필터링을 사용하는 전통적인 computer vision 기반 알고리즘에 의존하였으나, 본 논문에서는 YOLOv8 (You Only Look Once)와 같은 고성능 객체 감지 모델을 활용하여 중점 검출 전 자동으로 ROI(Region of Interest)를 설정하여 LED의 밝기에 따라 threshold를 가변적으로 조정하여 일정한 이진화 이미지를 얻어내고 이를 통해 웨이퍼 align mark 중점 검출 정밀도를 향상시킨다. 이로써 인공지능을 통해 정밀한 웨이퍼 중점 검출을 가능하게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 제안하는 웨이퍼 align mark 중점 검출 방법과 기존의 방법을 비교하고 사용한 모델의 학습 데이터 제작 및 파라미터에 대해 설명한다. 3장에서는 실험을 진행한 하드웨어 시스템의 구성에 대해 설명하고 적용된 기술에 대해 설명한 후 실험 방법을 설정한다. 4장에서는 제안한 방법의 실험결과, 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 짓는다.

2. 웨이퍼 align mark 검출 알고리즘 개발

2.1 가변 threshold 방식

기존의 웨이퍼 align mark 검출 방식은 계측 전 align mark의 위치를 입력한 뒤 계측 장비가 그 위치로 이동하여 특정 위치에 존재하는 align mark를 검색하게 된다. 이후 이미지 처리를 위해 고배율로 픽업된 그레이 레벨 데이터는 웨이퍼가 존재하는 영역을 BOXING 처리한 후 필터링을 진행한 뒤 이진화를 진행한다. 최종적으로 이진화 된 이미지를 통해 기하학적인 특징을 검출하여 중심을 찾게 된다. 하지만 계측과정에서 장비의 노후화로 인해 LED 밝기가 감소할 경우 align mark와 웨이퍼의 구분이 어려워 이미지 처리과정이 수월하지 않다. 따라서 라인에서는 일정한 그레이 레벨의 데이터를 얻기 위해 LED의 유지보수에 인력과 시간이 소모하는데, LED 교체 작업중에는 장비를 사용할 수 없으므로 필연적으로 생산성 저하를 야기하게 된다[5].

본 논문에서는 Fig 1과 같이 LED의 밝기에 관계없이, 학습된 인공지능모델 (Object detection)을 통해 align mark가 존재하는 위치를 파악하여 ROI를 먼저 설정한 뒤 ROI내

부의 그레이 데이터 통해 다음 수식 (1)을 사용하여 thresholding을 진행한다.

$$T = M + \sigma \quad (1)$$

T 는 임계값 (threshold)를 의미하며, M 은 2D 이미지 그레이 데이터의 평균을, σ 는 2D 이미지 그레이 데이터의 표준편차를 의미한다.

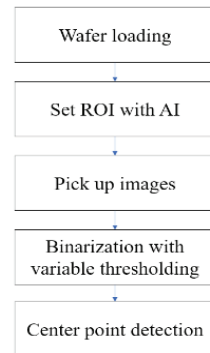


Fig. 1. Alignment method using variable thresholding.

Fig 2에서 픽업된 ROI의 그레이 데이터를 3D로 시각화하였다. Fig 3에서 초록색 점선은 본 논문에서 제안하는 방식을 적용하였을 때 threshold이다. 붉은색 점선은 threshold가 125로 설정된 상황이다. 푸른색 실선은 측정된 이미지의 그레이 레벨을 의미한다. 붉은색 점선 (고정 threshold)의 경우 일정한 이진화 데이터를 얻지 못함을 확인할 수 있다. 반면 제안하는 방법의 초록색 점선의 경우 threshold가 명확한 부분에 설정되어 온전한 결과물을 기대할 수 있다.

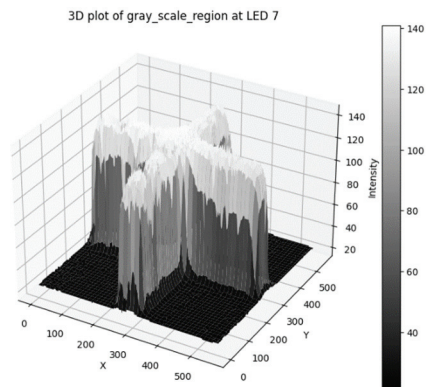


Fig. 2. Gray level of detected area.

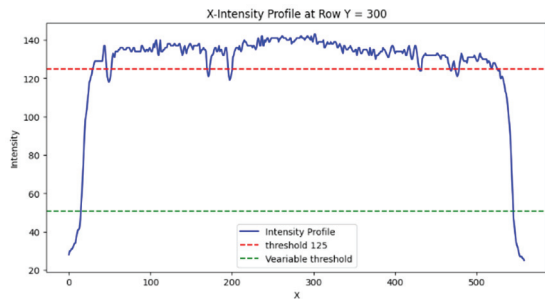


Fig. 3. Gray intensity profile at Row = 300.

2.2 웨이퍼 ROI 감지 모델

데이터 학습을 위해 LED밝기를 5-20까지 조절하며 총 599개의 이미지를 촬영하였으며 -5° 부터 $+5^\circ$ 까지 이미지의 회전과 파티클, 1%까지의 노이즈, 포커싱에 대응하기 위해 0.25px까지 blur를 적용시켜 1499장까지 데이터를 늘려서 학습에 사용하였으며 Training, Test의 비율을 Table 1과 같이 설정하였다.

모델 학습은 2592px * 1944px의 이미지를 324px * 324px로 축소하여 진행하였으며 Table 2와 같이 hyperparameter를 설정하여 학습시켰다. 작성한 parameter 이외의 parameter는 default값을 사용하였다[6].

Table 1. Statistics of dataset

Training		Test
Training set (90%)	Validation(8%)	Test set(2%)

Table 2. Hyperparameter for training

Parameter	Value
Learning rate	0.01
Batch size	16
Image size	324*324
Epoch	40

3. 실험 구성

3.1 시스템 Hardware 구성

본 논문에서 사용한 Hardware는 Fig. 4와 같이 웨이퍼 align mark 인식을 위해 Basler사의 acA2500-14gm (2592px * 1944px) 카메라를 사용하였으며 카메라 자체의 Pixel resolution은 2.2um이다. 실험에서는 pylon상용 프로그램을 통해 PC로 이미지를 전달받았다. 밝기에 따른 웨이퍼 align mark 관측과 회절의 영향을 최대한 줄이기 위해 웨이퍼 하단에 Blue LED (460nm)를 배치하였으며 이 LED는 LED controller를 통해 디지털 방식으로 밝기 조절이 가능하게 하였다.

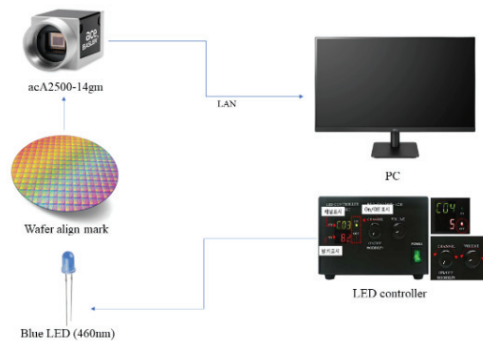


Fig. 4. Hardware system.

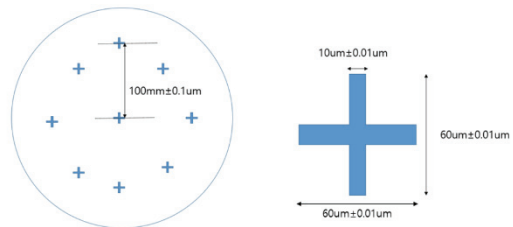


Fig. 5. Dimension of wafer align mark.

웨이퍼 align mark의 크기는 Fig. 5에서와 같이 십자가 모양이며 가로 60um 세로 60um 이다. 십자가의 두께는 10um이다. 실험을 진행한 align mark는 중앙에 존재하는 마크로 실험하였다.

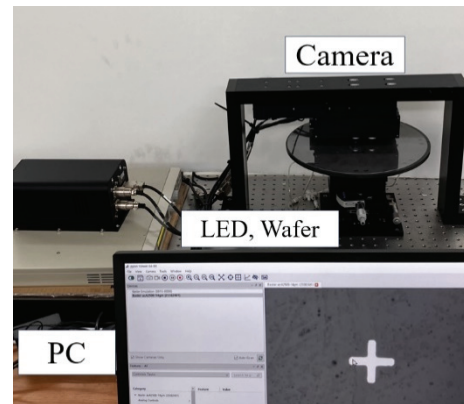


Fig. 6. Experiment setup.

Fig 6 에서는 실험을 위한 구성을 보여주고 있다. 카메라가 글래스 웨이퍼 수직 상단, 갠트리 아래 위치하고 있으며 LED는 글래스 웨이퍼를 고정해주는 척 수직 하단에 위치한다. 에어척은 3축매뉴얼 스테이지 위에 위치하고 있어 x,y,z로 움직일 수 있다.

3.2 Object detect 방법

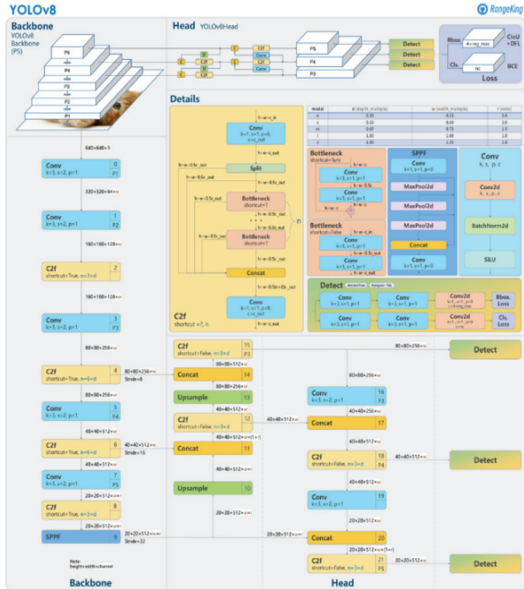


Fig. 7. YOLO v8 architecture [9].

자동으로 웨이퍼 align mark를 인식하여 ROI를 설정하기 위해 인공지능인 YOLO (You Only Look Once)를 사용하였다. YOLO는 객체 감지와 이미지 분류를 동시에 수행하는 신경망 기반의 컴퓨터 비전 모델이다. 2015년 입력 이미지를 S X S 그리드로 나누어 각각의 그리드 셀에 대해 경계 박스(Bounding Box), 신뢰 점수(Confidence Score)와 클래스 확률을 예측하는 v1버전을 시작으로 계속해서 발전된 모델이 공개되고 있다[9]. 본 연구에서는 YOLOv8을 사용하였으며 YOLOv8의 구조는 Fig 7과 같다. 가장 큰 특징은 앵커 프리 모델로서 예측되는 박스의 수를 줄여 Non-Maximum Suppression(NMS)의 속도를 빠르게 했다는 점이다[8].

3.3 실험 방법

앞에서 설명한 실험장비에 LED controller를 이용하여 웨이퍼 align mark 수직 밑에서 조사하는 LED밝기 level을 5-13까지 조정하며 카메라의 20배율로 촬영하였다. 이후 이미지 처리를 위한 이진화 과정에서 threshold를 125로 고정 한 이진화 결과물과 본 논문에서 제안한 가변threshold를 적용한 이진화 결과물을 비교하였다. 이후 중점을 찾기 위해 이진화 결과물을 이용하여 contour를 추출한 뒤 특정 조건을 만족하는 contour만 저장한다. 이후 contour를 포함하는 가장 작은 사각형을 그리고 사각형의 중점을 찾는 알고리즘을 이용하여 실험을 진행하였다.

4. 실험 결과

Table 3를 보면 Threshold가 고정되는 기존의 방식은 LED 8-12같이 특정 구간에서만 정확도와 정밀도를 유지하고 LED의 밝기가 변화될 경우 정밀도를 유지하지 못하는 문제를 확인할 수 있다. 결과적으로 LED 8-12 구간에서 정밀도 표준편차가 x축 $1\sigma = \pm 10.981px$ y축 $1\sigma = 14.2409px$ 임을 확인하였다.

Table 3. Center point through changes in LED brightness

LED	Variable threshold		Constant threshold	
	X	Y	X	Y
5	1990	1067	-	-
6	1991	1066	-	-
7	1991	1067	1961	1105
8	1991	1067	1991	1067
9	1991	1067	1991	1066
10	1991	1067	1991	1067
11	1991	1067	1990	1067
12	1991	1067	1989	1067
13	1991	1067	1140	984
S.D.	± 0.3142	± 0.3142	± 10.981	± 14.2409

반면에 제안된 가변 threshold방법을 사용할 경우 LED 8-12 구간에서 정밀도 표준편차가 x, y축 모두 $1\sigma = \pm 0.3142px$ 로 기존 방식 대비 30배 이상의 개선을 이뤄낼 수 있었다.

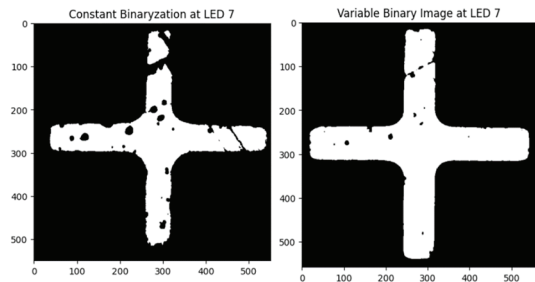


Fig. 8. Binary image comparison.

Fig 8에서 고정threshold 방식과 본 논문에서 제안한 가변 threshold방식의 LED 밝기7에서의 이진화 결과물을 비교하였다. 고정 threshold의 경우 제안한 가변 threshold방식에 비해 align mark의 edge가 왜곡된 것을 확인할 수 있다. 온전한 이진화 이미지를 얻지 못할 경우 다음 이미지 처리 과정에 심각한 영향을 끼칠 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 반도체 웨이퍼 align mark의 중점 검출 과정에서 LED 밝기변화에 따른 정밀도를 개선하기 위해 AI 기술을 적용하는 가변 threshold 기법을 제안하였다. 본 방법의 성능 개선은 밝기에 따른 align mark 인식 과정에서 AI를 적용하여 자동으로 ROI를 설정한 뒤 픽업된 그레이 데이터로 합리적인 threshold의 기준을 정하는 방법을 제시함에 기인하였다. 결과적으로 LED 밝기에 따른 wafer align mark의 중점 검출 정밀도를 30배 이상 개선할 수 있었다. 하지만 실제 반도체 생산 공정에서는 검출 속도 또한 중요한 요소이다. AI detection 과정에 사용한 YOLO모델은 객체 표현을 보다 일반화하여 빠르고 강력한 검출이 가능한 경량화 모델이지만 앞서 논문에서 비교한 기존 방식에 비해 속도가 느리다는 단점이 있었다[10]. 추후 이를 개선하기 위해 신경망의 추가적인 fine tuning을 연구하여 개선하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원을 통해 수행되었습니다. (Nos. 20023103 and KM230314).

참고문헌

1. Bourjot, E., & Fournel, F. (2022, September-October). Direct bonding: a key enabler for 3D technologies. *Chip Scale Review*, 6-7.
2. Lee, S. H., Chen, K. N., & Lu, J. J. Q. (2011). Wafer-to-wafer alignment for three-dimensional integration: A review. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 20(4), 885-898.
3. Hynix Semiconductor Co., Ltd. (2008). "Method for Defect Inspection on a Wafer" (Patent No: 10-2008-0061938). Korean Intellectual Property Office.
4. Okamoto, K., Sugiyama, M., & Mabu, S. (2020). Importance of Advanced Metrology in Semiconductor Industry and Value-added Creation Using AI/ML. *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 18, 214-222.
5. Samsung Electronics Co., Ltd. (2004). "Method for Recognizing Alignment Mark Patterns" (Patent No: 10-2004-0017132). Korean Intellectual Property Office.
6. Lee, T. H., & Park, C. S. (2023). Real-Time Fire Detection Method Using YOLOv8. *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, 22(2), 77.
7. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-time Object Detection", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.779-788, 2015.
8. G. Ang, et al. "A novel application for real-time arrhythmia detection using YOLOv8." *arXiv preprint arXiv:2305.16727*, 2023.
9. RangeKing (Range King) · GitHub
10. Lee, Y.-H., & Kim, Y. (2020). Comparison of CNN and YOLO for Object Detection. *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, 19(1), 85.

접수일: 2023년 11월 28일, 심사일: 2023년 12월 8일,
게재확정일: 2023년 12월 12일