

하이브리드 인공신경망을 이용한 웨이퍼 온도 분포 예측 기법 및 센서 수 최적화에 관한 연구

김수현^{*,1} · 김종원^{**,2} · 박준영^{*,3} · 소홍윤^{*,†}

*한양대학교 융합기계공학과, **한양대학교 디지털의료융합학과, † 한양대학교 기계공학부

¹harry16153@naver.com, ²jwk4ever@naver.com,

³wie0118@hanyang.ac.kr, [†]hyso@hanyang.ac.kr

Prediction of Wafer Temperature Distribution and Optimizing the Number of Sensors Using Hybrid Neural Network

Sooheon Kim^{*,1}, Jongwon Kim^{**,2}, Junyoung Park^{***,3}, Hongyun So^{*,†}

* Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University

** Department of Medical and Digital Engineering, Hanyang University

† Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

요약

웨이퍼의 열 분포 균일성은 반도체 공정 수율에 영향을 미치는 중요한 요소로, 공정 중 열 분포를 정확히 파악하는 것이 필수적이다. 기존에는 웨이퍼 후면에 부착된 소수의 온도 센서에 의존하여 열 분포를 추정했으나, 이 방법은 웨이퍼 전역의 온도 분포를 정밀하게 파악하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 소수의 온도 센서 데이터만으로 공정 중 웨이퍼 전면의 열 분포를 이미지 형태로 예측할 수 있는, DNN(Deep Neural Network)과 CNN(Convolutional Neural Network)을 결합한 하이브리드 인공신경망 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 공정 중 열 결함이 발생한 상황에서도 웨이퍼 표면의 열 분포를 효과적으로 예측할 수 있으며, 예측 정확도를 확보하기 위해 필요한 센서 수를 최적화한다. 이를 통해 반도체 공정 중 수율 저하를 예방하고, 에너지 소비 절감 및 생산성 향상에 기여할 수 있다.

I. 서론

반도체 제조 공정이 정밀화 되고 이에 따른 수율 향상이 산업계의 주요 목표로 부각되고 있으며, 이에 따라 공정 중 웨이퍼의 열 균일성 확보가 중요한 과제로 주목받고 있다. 웨이퍼 상의 불균일한 열 분포는 증착, 식각 등 주요 공정의 신뢰성을 저하시키고, 최종 디바이스 불량을 초래할 수 있다. [1] 이를 방지하기 위해 TC-Wafer [2] 등 온도 센서를 이용해 웨이퍼의 열 상태를 모니터링하고자 하나, 이러한 방식은 국부적인 영역의 열 분포만을 제공하여 웨이퍼 전역의 열 특성을 파악하는 데 한계가 있다. 또한, CAE 해석을 통해 웨이퍼 열 분포를 이미지화하는 방법은 높은 계산 비용과 복잡성으로 인해 실시간 적용이 어렵다. [3] 최근 인공지능 기법은 이러한 문제를 해결할 수 있는 유망한 접근법으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 DNN(Deep Neural Network)과 CNN(Convolutional Neural Network)을 결합한 하이브리드 인공신경망인 HNN(Hybrid Neural Network) 알고리즘을 구축하여, 소수의 온도 센서 데이터만으로 공정 중 웨이퍼 전 영역의 열 분포를 이미지 형태로 정확하게 예측하는 기법을 제안한다. 또한, 높은 예측 정확도를 달성하기 위해 필요한 센서 수를 최적화함으로써, 설비 투자 비용 절감 및 반도체 공정 중 수율 저하에 따른 에너지 소비를 줄이고 생산성 향상에 기여하고자 한다.

II. 본론

딥러닝 알고리즘의 입력으로 사용할 온도 데이터와 이에 대응하는 출력 이미지 데이터를 획득하기 위해 IR 카메라를 도입하였다. IR 카메라는 웨이퍼 상부를 촬영할 수 있도록 위치시켰으며, 핫플레이트를 이용해 웨이퍼를 가열하여 균일한 열 분포를 확보한 후, 가열된 소형 분동을 웨이퍼 표면에 위치시켜 공정 중 외적 요인에 의한 불균일한 열 분포 발생 환경을 모사하였다. 이러한

과정을 통해 수집된 데이터는, 수치 데이터(온도 데이터) 특징 추출에 특화된 DNN 이미지 데이터 특징 추출에 특화된 CNN을 결합한 하이브리드 인공신경망 알고리즘에 적용하여 학습을 진행하였다. 이때 Figure 1은 수집된 데이터를 이용해 학습을 수행했을 때, 딥러닝 모델이 혼합된 알고리즘이 단일 딥러닝 알고리즘 대비 안정적으로 수렴하는 양상을 나타낸다.

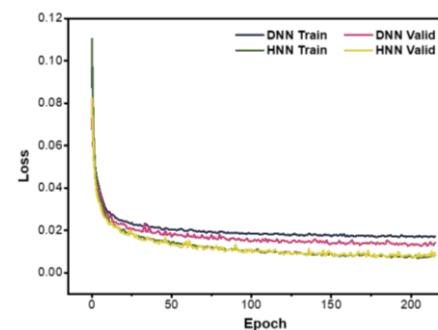


Figure 1. 하이브리드 인공 지능 모델의 학습 수렴성

구축한 하이브리드 인공신경망의 성능을 검증하기 위해 다양한 열 결함의 위치와 개수를 포함한 총 144 개의 입력 및 출력 시험 데이터를 추가 확보하였다.

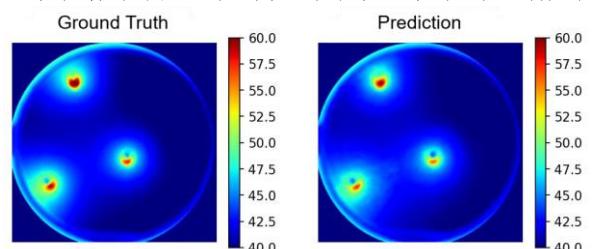


Figure 2. 웨이퍼 온도 분포 예측 성능

Figure 2는 시험 데이터를 하이브리드 인공신경망에 적용한 예시를 보여주며, 실제 열 분포 이미지와 예측

이미지가 육안으로도 매우 유사함을 확인할 수 있다. 이미지 유사성 지표로 사용되는 SSIM(Structural Similarity Index Measure)의 평균 값은 0.9614 를 기록하였으며, 일반적으로 고성능 예측 결과로 평가되는 SSIM 0.9 이상을 달성한 데이터 비율은 96.53%에 달하였다. 해당 결과는 웨이퍼 표면 8 개 지점에서 수집된 데이터를 기반으로 도출된 것이며, 수집 위치 수를 1 개부터 8 개까지 변화시키며 수행한 케이스 스터디 결과, 최소 4 개 지점에 대한 온도 데이터를 확보하더라도 평균 SSIM 이 0.9525 에 도달함을 확인하였다. 이를 통해 수집 위치 수에 대한 최적화도 함께 수행하였다

III. 결론

본 연구는 본 연구는 기존 온도 센서 및 CAE 기반 방식이 웨이퍼 전 영역의 열 분포를 빠르고 정확하게 파악하는 데 한계가 있다는 문제를 해결하고자, DNN 과 CNN 을 결합한 하이브리드 인공신경망(HNN)을 제안하였다. 열 불균일성을 유발하는 다양한 열결함 위치 및 개수 조건에서 수집한 온도 데이터와 이미지 데이터를 활용하여 학습을 진행한 결과, 구축된 HNN 이 소수의 온도 데이터만으로 높은 정확도의 웨이퍼 전체 열 분포 이미지를 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한, 최적화된 온도 데이터 수집 위치 수를 도출하여, 높은 이미지 예측 정확도를 확보하기 위한 최소 센서 수를 도출하였다. 본 연구 결과를 통해 반도체 공정 중 엔지니어가 웨이퍼의 실시간 온도 분포를 직관적으로 모니터링할 수 있으며, 불균일한 열분포 발생 시 이를 빠르게 탐지하여 공정 수율 저하를 방지할 수 있다. 아울러, 설비 제작 및 보완 시 기존 대비 적은 수의 센서만으로 동일 이상의 성능을 확보할 수 있어 설비 투자 비용 절감이 가능하다. 향후 본 인공지능 모델을 산업 현장에 적용함으로써 반도체 공정의 품질과 신뢰성을 높이고, 생산성 향상 및 에너지 효율 개선에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 (grant no. 20202000000010)의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Fang, Weileun, and Chun-Yen Lo. "On the thermal expansion coefficients of thin films." Sensors and Actuators A: Physical 84.3 (2000): 310–314.
- [2] Kreider, Kenneth G., and Greg Gillen. "High temperature materials for thin-film thermocouples on silicon wafers." Thin Solid Films 376.1-2 (2000): 32–37.
- [3] Chang, Norman, et al. "Thermal Modeling and Simulation for Advanced 3DIC Systems." Direct Copper Interconnection for Advanced Semiconductor Technology. CRC Press 299–360.