

학부생 연구학점제 연구결과보고서(학생용)

- 연구제목: Oxide Etch Rate Prediction under Varying O2 using Stepwise Forward Selection of Principal Components
- 연구기간: 12/22~1/26
- 연구결과 요약

반도체 공정의 미세화 및 3D 구조화로 공정 단계가 증가함에 따라, 식각률을 즉시 파악하기가 점점 어려워지고 있습니다. 기존 물리 계측은 결과 확인까지 지연이 발생하여 이상 징후에 대한 즉각적 공정 제어(Run-to-Run 제어)에 한계가 있습니다. 따라서 본 연구는 센서 기반 가상 계측(Virtual Metrology, VM) 모델을 구축하여 SiO₂ 식각률을 실시간 예측하는 것을 목표로 했습니다.

전체 분석은 OES와 VI probe에서 얻은 raw data를 Actinometry, Ar Line-ratio 등 기법을 통해 플라즈마 내부 물리량을 반영하는 변수로 변환하는 과정에서 시작했습니다. PCF(Pearson Correlation Filter), SVS(Stepwise Vector Selection), PCA(Principal component Analysis)를 통해 각각 상위 변수를 비교한 뒤 예측 성능을 높이는 방향으로 변수 조합을 최적화했습니다. 특히 PCA로 도출된 주 성분(PC)을 추가 변수로 반영한 뒤 SVS를 재수행함으로써 단일 기법에 의존할 때 발생하는 편향과 변수 간 종속성 문제를 완화하고자 했습니다.

화학적 메커니즘 측면에서는 OES 데이터를 활용해 라디칼 밀도를 정량화(상대 변화 추정)하는 Actinometry 기법을 적용했습니다. Actinometry는 목표 라디칼의 발광 강도를 불활성 가스인 Ar의 발광선과 비교하여 라디칼 밀도 변화(n_x)를 추정하는 방식입니다. SiO₂는 플라즈마 내 F 라디칼과 반응하여 휘발성 부산물인 SiF₄를 형성함으로써 고체 표면이 기상으로 전이되며, 대표 반응은 SiO₂(s) + 4F(g) → SiF₄(g)↑ + O₂(g)로 정리됩니다. 또한 O₂ 첨가 시에는 C(s) + O(g) → CO(g)↑, CF_x(s) + O(g) → COF_x(g)↑ 등의 반응을 통해 폴리머가 제거되고, 결과적으로 CF_x로부터 F 라디칼이 해방되는 경향이 나타나 화학적 식각이 가속화될 수 있습니다. 따라서 nF, nO, nCO, nCF₂, nCF 변수를 생성했으며, NIST 기준으로 대표성이 높은 피크를 2개씩 선정해 변수에 반영했습니다.

또한 특정 파장 간 강도 비율이 전자 온도(T_e), 전자 밀도(n_e)와 상관관계를 갖는다는 점에 기반해 Ar line-ratio 기법을 적용했습니다. 문헌에서 line-ratio로 사용하는 파장 조합을 power 조건별로 정리한 뒤 slope/intensity를 도출했고, 이를 ion probe에서 얻은 ion density 및 electron temperature와 비교했습니다. 그 결과 PCF가 가장 높은 ratio 2개를 각각 전자 온도 및 전자 밀도를 대표하는 변수로 선정했습니다.

2026년 1월 28일

제출자 : 노하은 (인)

일반대학원장 귀하

학부생 연구학점제 연구결과보고서(학생용)

- 연구제목: Oxide Etch Rate Prediction under Varying O₂ using Stepwise Forward Selection of Principal Components
- 연구기간: 12/22~1/26
- 연구결과 요약

VI 프로브를 통해 도출된 전압(Voltage), 전류(Current), 위상(Phase), 임피던스(Impedance), 전력(Power), 반사 전력(Reflected Power)의 6가지 기본 변수는 웨이퍼 표면의 Ion-enhanced etching 와 Physical sputter 거동을 반영하는 지표로 활용했습니다. 전압은 sheath를 가로지르는 이온 에너지를 결정하여 표면 bombardment를 유도하고, 전류와 임피던스는 공급된 RF 에너지가 플라즈마 부하에 어떻게 coupling 되는지를 나타내 단위 시간당 표면 반응에 기여하는 에너지 강도를 반영합니다. 위상과 전력 계열 변수는 챔버 내부로의 실제 에너지 전달 효율 및 플라즈마의 전기적 특성 파악에 중요한 항목으로 고려했으며, 이를 바탕으로 coupling efficiency, effective power라는 조합 변수를 만들어 추가했습니다.

변수 선택 결과 단일 기법인 Pearson($R^2=0.7846$)이나 PCA($R^2=0.8246$)는 OES 기반 변수로 선택이 편중되거나 변수 간 종속성이 커져 VI 신호가 가려지는 문제가 확인되었습니다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 식각률에 지배적 영향을 미치는 주요 라디칼 밀도(nF, nO 등)를 핵심 변수로 먼저 확정된 뒤, 데이터의 주된 변동성뿐 아니라 VI 기반의 미세 공정 변화를 포함할 수 있는 낮은 분산의 주성분 축(PC4~PC15)을 변수군으로 추가하여 SVS를 재실행했습니다. 그 결과, 지배적 화학 인자(OES) 위에 공정 효율 및 미세 변동 성분(VI가 반영된 PC 변수)이 보완되면서 최종 모델의 예측 성능을 $R^2=0.8806$ 까지 향상시켜 정확도를 높였습니다.

2026년 1월 28일

제출자 : _____ 노하은 (인)

일반대학원장 귀하

학부생 연구학점제 연구결과보고서(학생용)

○ 연구제목: Oxide Etch Rate Prediction under Varying O₂ using Stepwise Forward Selection of Principal Components

○ 연구기간: 12/22~1/26

○ 연구결과 요약 (느낀점)

연구를 진행하며 배운 점은 예측 성능의 핵심이 raw data에서 변수를 단계적으로 정제·축소하는 전체 파이프라인에 있다는 점이었습니다. OES/VI raw 데이터는 식각률에 영향을 줄 수 있는 후보 신호가 과도하게 많아 변수를 무작정 늘리면 과적합과 일반화 성능 저하로 이어질 수 있었습니다. 따라서 물리·화학적 의미를 갖는 변수로 1차 변환한 뒤, 필수 변수는 최소 집합으로 확정하고 나머지는 종속성을 줄이는 방향으로 제한적으로 포함시키는 것이 필요하다고 느꼈습니다.

특히 플라즈마 SiO₂ 식각은 단일 인자로 설명되기보다 라디칼 생성-표면 반응-부산물 탈착이 연쇄적으로 연결된 반응계이므로 각 단계의 역할을 이해하는 것이 중요했습니다. 표면에서는 F 라디칼에 의한 Si-O 결합 절단과 SiF₄ 형성(volatile product)이 식각의 핵심이며, 동시에 CF_x 폴리머의 증착/제거 균형이 passivation 정도를 좌우해 식각 속도에 영향을 줄 수 있음을 확인했습니다. O₂는 폴리머를 CO/COF_x로 산화 제거해 표면 passivation을 약화시키고, 기상에서는 O 라디칼이 CF_x를 COF_x로 전환해 CF_x 농도를 낮추면서 유효 F 라디칼을 증가시켜 식각을 강화할 수 있었습니다. 반면 O₂가 과도한 조건에서는 라디칼 balance 변화로 F의 유효 농도가 감소하거나 반응 경로가 달라져 식각률이 저하되었습니다. 또한 RF 조건과 sheath 전압이 결정하는 이온 에너지는 표면 반응을 활성화하고 부산물 탈착을 촉진하는 ion-enhanced etching 성분을 형성하여, 라디칼과 이온이 함께 변할 때 식각률이 민감하게 변한다는 점을 배웠습니다.

이 때문에 OES 신호를 단순 스펙트럼 강도로 다루기보다 Actinometry를 통해 라디칼 밀도 변화(nr, no 등)를 정량화하고, line-ratio로 전자 온도/밀도 변화를 반영하는 등 반응·여기 메커니즘을 고려한 변수로 변환하는 과정이 중요하다고 느꼈습니다. 동시에 VI 변수는 전력 전달과 이온 가속 조건을 반영하므로, 표면 반응의 이온 에너지/플럭스와 연결해 해석 가능한 형태로 정리해야 한다는 점을 배웠습니다. 이때 feature selection 과정은 해석과 결론의 타당성을 결정하는 단계로써, 어떤 변수를 왜 만들고(정의), 왜 선택·제외하는지(근거)를 명확히 정리하고 PPT에도 명시해야 설득과 전달이 명확해질 것 같습니다. 기존 파이프라인 없이 데이터 전처리-변수 정의-선택 기준 수립-모델 검증은 처음부터 구축하다 보니 결과보다도 선택 기준과 근거를 체계화하는 과정을 많이 배운 것 같습니다. 또한 분석 내용의 정확도만큼 제목/스토리라인/적용 범위를 명확히 정리하는 것이 중요하다고 느꼈습니다. 접근이 공정 전반에 일반화 가능한지 또는 특정 조건에서만 유효한지에 대한 범위를 선제적으로 구분해 제시해야 보고서와 발표의 설득력이 높아진다는 점을 느꼈습니다.

2026년 1월 28일

제출자 : _____ 노하은 (인)

일반대학원장 귀하