

플라즈마 정보인자 기반 가상계측을 통한 Si 식각률의 첫 장 효과 분석

유상원^{**}·권지원^{*}

^{*†} 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

Analysis of First Wafer Effect for Si Etch Rate with Plasma Information Based Virtual Metrology

Sangwon Ryu ^{*†} and Ji-Won Kwon ^{*}

^{*†}Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

Plasma information based virtual metrology (PI-VM) that predicts wafer-to-wafer etch rate variation after wet cleaning of plasma facing parts was developed. As input parameters, plasma information (PI) variables such as electron temperature, fluorine density and hydrogen density were extracted from optical emission spectroscopy (OES) data for etch plasma. The PI-VM model was trained by stepwise variable selection method and multi-linear regression method. The expected etch rate by PI-VM showed high correlation coefficient with measured etch rate from SEM image analysis. The PI-VM model revealed that the root cause of etch rate variation after the wet cleaning was desorption of hydrogen from the cleaned parts as hydrogen combined with fluorine and decreased etchant density and etch rate.

Key Words : Virtual Metrology, Plasma Information, First Wafer Effect, Optical Emission Spectroscopy, Plasma Etch

1. 서 론

고집적도 소자 요구에 따른 반도체 및 디스플레이 제조 공정의 난이도 증가로 인해 공정 결과 편차 관리를 위한 공정 환경 변화 진단 및 제어 기술의 필요성이 증대되고 있다. 특히 건식 공정에 쓰이는 플라즈마로 인한 플라즈마 대면 부품의 표면 상태 변화는 동일한 공정 레시피에서도 장치의 이력에 따라 공정 결과의 차이를 가져오기 때문에 주요 관리 대상으로 연구되고 있다.[1] 공정 변동의 관리를 위해 공정 결과를 주기적으로 계측하는 방법이 실제로 사용되고 있으나[2] 복잡해진 소자 구조로 인한 공정 단계의 증가로 모든 웨이퍼를 직접 계측하는

것은 비효율적이 되고 있다. [3] 실측 주기 사이의 계측을 대체하고 보완하기 위하여 가상계측 기술(Virtual Metrology)이 연구되어왔다.[4,5] 가상계측 기술은 실시간으로 수집된 공정 장비, 센서의 데이터를 통계적인 방법론에 입력하여 활용하여 공정 결과를 예측하는 기술이다.[4,5] 한 번 가상계측 모델을 훈련하면 공정 장비, 센서 데이터만으로도 지연 없이 공정 결과를 예측할 수 있어 모든 웨이퍼에 대한 공정 결과 데이터를 얻을 수 있다.

최근 플라즈마 정보인자(Plasma Information, PI)를 가상계측의 입력 인자로 사용하는 PI-VM이 개발되고 있다.[6-8] PI 인자는 센서 데이터에 혼재 되어있는 플라즈마의 특정 정보를 플라즈마 물리 기반으로 추출한 새로운 인자로, 플라즈마 사용하는 건식 공정에서 공정의 변동을 기성의 가상계측에 사용하던 인자들보다 민감하게 추적할 수 있음이 밝혀졌다. PI 인자를 입력으로 활용하였을 때, 가장

[†]E-mail: swryu@snu.ac.kr

높은 예측 성능을 가지는 가상계측 기술 개발 방법론은 단계적 변수 선택법(Stepwise Variable Selection) 기반의 다중 선형회귀분석(Multi-linear Regression) 임이 알려져 있다.[8]

본 연구에서는 선형 연구에서 개발된 PI 인자 개발 방법론 및 PI-VM 개발 방법론을 바탕으로 식각 공정 장비의 플라즈마 대면 부품을 습식 세정하였을 때 초기 웨이퍼의 식각률이 감소되는 첫 장 효과를 예측하는 가상계측 기술을 개발하고, 첫 장 효과의 원인을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 장비 셋업 및 식각 실험 조건

본 연구에서는 300 mm 웨이퍼의 식각이 가능한 축전결합형 플라즈마 발생 장치를 사용하였다. 공정 장비는 Fig. 1과 같이 상부 전극, 하부 전극으로 구성되어 있으며, 상부 전극은 접지가 되어있고, 하부 전극에는 60 MHz의 고주파 전력이 matching network를 통해 전달되어 플라즈마를 발생시켰다. Mass flow controller (MFC)를 통해 식각 장비 내부로 SF₆, O₂, Ar 혼합 가스가 유입되었으며, turbomolecular pump 와 반응기 사이의 throttle valve의 position을 제어하여 반응기 내부 압력은 20 mTorr로 유지되었다. 60 MHz 전원, matching network, MFC, 압력계, throttle valve의 데이터는 모두 0.2초 간격으로 UDP 통신을 통해 외부 컴퓨터에 전달되어 기록되었다.

발생된 플라즈마의 PI 인자 추출을 위해 외부 시창구에 광섬유를 부착하여 반응기 중앙의 빛을 OES 센서에 조사하였다. OES 센서는 플라즈마의 파장 별 빛의 세기를 0.2 nm 해상도로 분광한 데이터를 0.2초 간격으로 USB 통신을 통해 외부 컴퓨터에 전달하여 기록하였다.

본 연구에 사용된 시편은 5μm 너비의 photoresist (DPR-i5500, 4000 rpm, 1 μm 두께)를 5μm 간격으로 반복하여 올린 Si 웨이퍼를 가로, 세로 1 cm로 자른 쿠폰이며, 하부 전극에 올려진 300 mm wafer의 중앙에 시편을 부착하고 식각을 수행하였다. 플라즈마 대면 부품의 유지 보수 직후 발생하는 식각 공정의 첫 장 효과를 모사하기 위하여 플라즈마 대면 부품을 에탄올로 습식 세정한 후 Table 1의 레시피로 식각 공정을 연속으로 4회 수행하는 것을 9번 반복하여 총 36번의 식각을 수행하였다. 각 식각을 수행할 때마다 시편을 교체하여 시편의 단면을 전자현미경으로 촬영하였으며, Fig. 2과 같이 식각 깊이를 측정하였다. 습식 세정 이후 연속으로 4회 식각 깊이를 측정한 결과 Fig. 3과 같이 초기 두 웨이퍼에서 식각률이 낮고, 3, 4번째 웨이퍼에서 식각률이 증가하여 유지되는 것을 볼 수 있었으며, 이를 본 연구에서는 첫 장 효과의 모사 실험으로 가정하였다.

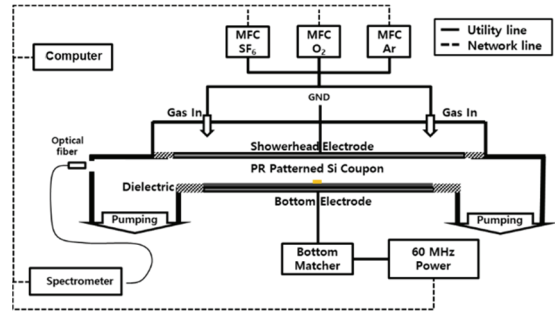


Fig. 1. Schematic of Si etch system.

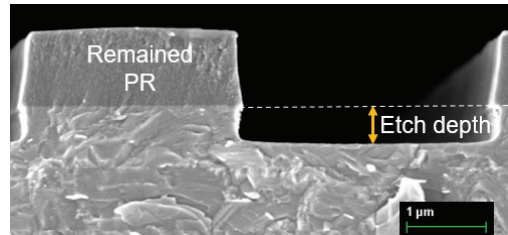


Fig. 2. SEM cross-section image of etched coupon.

Table 1. Si etching recipe

Power (W)	Pressure (mTorr)	Ar (sccm)	SF ₆ (sccm)	O ₂ (sccm)
900	20	50	120	50

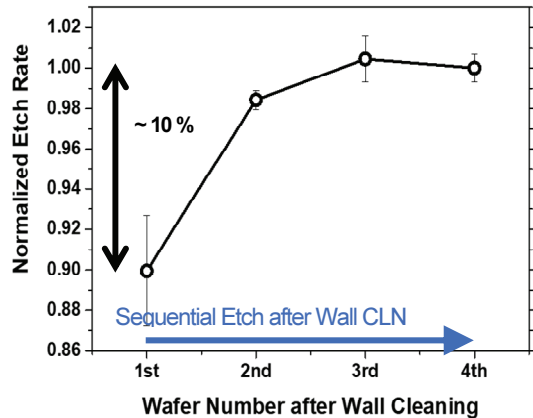


Fig. 3. Wafer-to-wafer etch rate variation (simulated first wafer effect) after wet cleaning of wall by ethanol.

2.2 플라즈마 정보 인자 추출

반도체 식각 공정 플라즈마는 저온, 저압 플라즈마로 플라즈마 내에서 발생하는 빛의 세기(I_{λ})는 수식 (1)과 같이 corona equilibrium (CE)을 따르는 것으로 알려져 있다.[9]

$$I_X = n_e n_X \int \sigma(E) \sqrt{E/2m_e} f(E) dE \quad (1)$$

n_e 는 플라즈마 내 전자의 밀도, n_X 는 입자 X의 ground state 밀도, σ 는 전자와 입자 X의 여기 충돌확률, E 는 전자의 운동 에너지, m_e 는 전자의 밀도, f 는 전자 에너지 분포 함수를 뜻한다. 즉, 전자와 입자 사이의 여기 충돌과 들뜬 상태의 입자로부터 방출되는 빛의 세기가 균형을 이루며, 이로 인해 플라즈마에서 방출되는 빛의 세기에는 전자의 밀도, 전자의 온도, 입자의 밀도 등의 정보가 혼재되어 있다. 광신호 센서 데이터를 플라즈마 분광학 모델을 이용하여 전자의 밀도, 전자의 온도, 입자의 밀도 등의 정보로 추출한 것을 플라즈마 정보(PI) 인자라고 한다. [10]

본 연구에서는 사전 연구에서 제시된 Ar의 두 여기 상태에서 방출되는 빛의 세기 비율을 이용하여 전자 에너지 분포를 추출하는 방법을 사용하여 전자 온도를 얻었으며 [10], Ar과 라디칼 입자에서 방출되는 빛의 세기 비율을 이용하여 라디칼 입자의 밀도를 추출하는 actinometry를 사용하여 플라즈마 내 F, O, H 라디칼의 밀도를 추출하였다. [11,12]

3. 결과 및 논의

3.1 식각률 가상계측 모델 개발

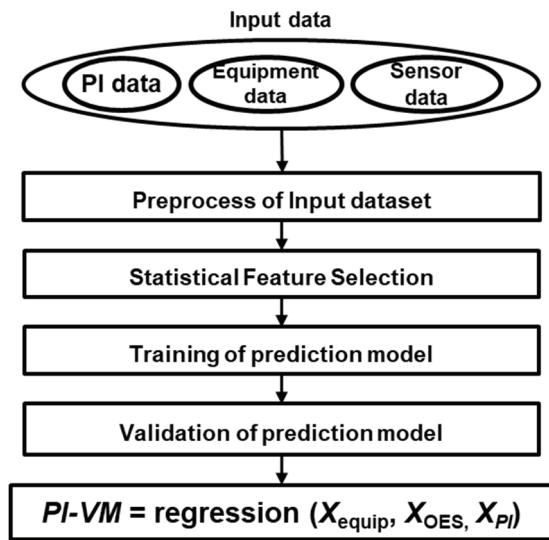


Fig. 4. Flowchart to develop PI-VM.

플라즈마 정보 인자 기반의 가상계측 모델은 Fig 4에 제시된 flowchart에 따라 개발되었다.[8] 2.1 절에서 언급되었던 36번의 식각률 수행하면서 얻은 장비 데이터, OES 센

서 데이터, PI 인자 데이터를 정규화(normalize) 하여 입력 인자로 사용하고, 전자현미경으로 촬영한 식각 깊이를 공정 시간으로 나눈 식각률을 예측 대상으로 하고, 단계 선택법(stepwise variable selection)과 다중선형회귀(multi-linear regression)를 이용하여 가상계측 기술을 개발하였다. 36개의 데이터 세트 중 30개의 데이터 세트는 가상계측 모델의 훈련에 사용되었으며, 6개의 데이터 세트는 가상계측 모델의 검증에 사용되었다.

개발된 가상계측 모델은 수식 (2)와 같이 구성되었다.

$$ER = \sum w_i X_i = w_F n_F + w_H n_H + w_T T_e + w_{TVP} TVP + w_C C_{load} \quad (2)$$

ER는 식각률, w_i 는 각 인자의 계수, X_i 는 가상계측모델의 특성 인자(feature), n_F 는 플라즈마 내 F의 밀도, n_H 는 플라즈마 내 H의 밀도, T_e 는 전자의 온도, TVP는 압력을 조절하는 throttle valve potentiometer의 position 값, C_{load} 는 matching network의 load capacitor의 정전용량을 뜻한다. 가상계측 모델의 특성 인자로 선택된 인자 및 그 계수는 3.2절에서 분석하였다.

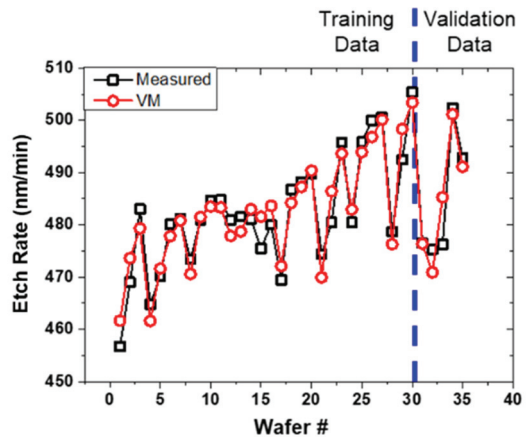


Fig. 5. Etch rate measured from SEM image analysis (black, square) and expected from PI-VM model (red, circle).

Fig 5는 전자현미경 이미지 분석을 통해 측정된 Si 쿠폰의 식각률과 가상계측 모델로 예측한 식각률을 함께 그린 결과다. 가상계측 모델이 훈련 데이터 세트, 검증 데이터 세트에서 모두 높은 예측율을 보이는 것을 알 수 있으며, 훈련 데이터 세트에서의 상관계수 R^2 는 0.914, 검증 데이터 세트에서의 상관계수 Q^2 는 0.83였다. 좋은 가상계측

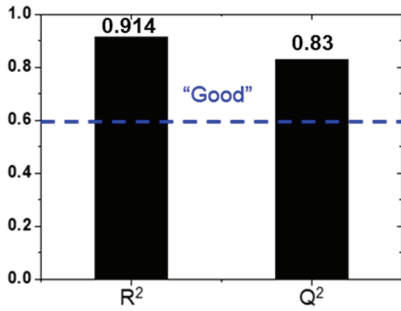


Fig. 6. Correlation coefficient for training data set ($R^2 = 0.914$), and validation data set ($Q^2 = 0.83$).

모델은 상관계수가 0.5보다 커야 하며, 특히 검증 데이터 세트에서의 상관계수가 높아야 과적합이 일어나지 않은 모델로 볼 수 있다. [7] 따라서 본 연구에서 개발한 Si 시편의 식각률 가상계측 모델은 과적합 없이, 높은 예측 성능을 보인다고 평가할 수 있다.

3.2 식각률 첫 장 효과 분석

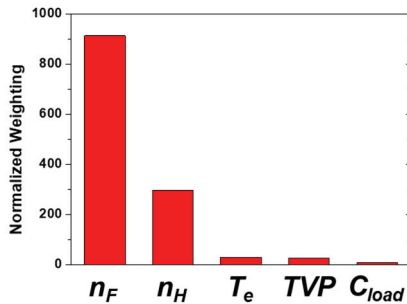


Fig. 7. Normalized weighting for feature of PI-VM model.

Fig 7은 개발된 가상계측 모델의 특성인자의 정규화 된 계수 값을 나타낸다. 플라즈마 내 F의 밀도가 900으로 가장 높은 계수를 가지며, 플라즈마 내 H의 밀도가 300으로 두번째로 높은 계수를 가지고, 나머지 인자들은 20이하로 매우 낮은 계수를 가진다. F는 식각 공정 플라즈마에서 Si와 결합하여 SiF_2 , SiF_4 형태로 Si를 식각시키는 기여종으로 식각률을 결정하는데 주요한 인자이기 때문에 가상계측 모델에서도 가장 높은 기여도를 보인다. H는 식각 공정 레시피에는 포함되지 않은 가스로 플라즈마 대면 부품의 에탄올 세정으로부터 발생한다. 플라즈마 대면 부품에 물리적으로 흡착 되어있던 에탄올 입자가 플라즈마 방전으로 인해 조금씩 떨어져 나오며 해리되어 플라즈마 내에 H 원자를 만들어 낸다. H 원자는 F 원자와 높은 반응성을 가지며, HF를 형성하여 F의 밀도를 감소시키는 역할을 한

다. 따라서 H의 밀도는 플라즈마 대면 부품의 세정으로 인한 장비 상태를 대변하는 인자이며, 이는 가상계측 모델에서 식각 기여종인 F의 밀도를 감소시켜 식각률을 감소시키는 정도를 나타낸다.

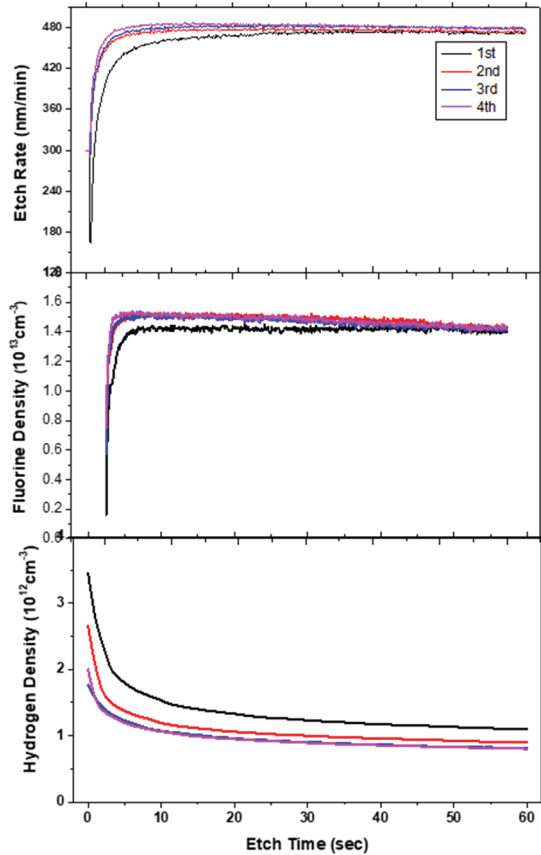


Fig. 8. Time varying etch rate estimated by PI-VM model (a), fluorine density (b) and hydrogen density (c) for sequential etch processes after the wet cleaning of plasma facing parts.

Fig 8은 장비 내 플라즈마 대면 부품을 에탄올로 습식 세정한 후 연속적으로 식각 공정을 4회 수행하였을 때, 시간에 따른 식각률(PI-VM), F 밀도, H 밀도를 나타낸다. PI-VM 특성인자 분석을 통해 F 밀도가 식각률을 주로 결정하며, 습식 세정 후 부품에 남아있는 에탄올에 의한 H이 F와 결합하여 F의 밀도 및 식각률을 감소시킴을 해석하였다. Fig 8에서도 습식 세정 후 첫 장에서 가장 높은 H 밀도가 관측되었고, 연속적인 식각 공정 수행에 따라 H의 밀도가 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 F의 밀도와 식각률도 첫 장에서 가장 낮으며 식

각 공정을 반복함에 따라 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 가상계측 모델은 습식 세정에 의한 식각률의 첫 장 효과를 예측할 수 있으며, 그 원인을 특성인자에 포함하고 있다. 가상계측 모델의 특성인자 분석 및 시계열 데이터로부터 첫 장 효과의 원인은 습식 세정으로 인해 플라즈마 대면 부품에 잔류한 에탄올로부터 발생하는 H임을 확인하였다.

4. 결 론

PI-VM은 공정 결과에 직접적으로 영향을 주며, 장비의 상태를 대변할 수 있는 PI 인자를 특성 인자로 포함하기 때문에, 공정 환경이 급격하게 변화하는 조건에서 공정 결과의 변동을 높은 예측 성능으로 가상계측 할 수 있음이 확인되었다. 플라즈마 대면 부품을 에탄올로 습식 세정하였을 때 발생하는 Si 식각률의 첫 장 효과는 부품을 잔류한 에탄올로부터 발생하는 H에 의한 식각 기여종인 F의 밀도 감소로 인해 나타남이 PI-VM의 특성인자로부터 분석되었다. PI-VM은 원인을 포함한 가상계측 기술이므로 높은 예측 성능을 보일 뿐만 아니라 장비의 상태를 모니터링하여 이상을 감지하거나 분류하는 기술(Fault detection and classification), 공정 장비의 정비 주기를 결정하는 기술(Predictive maintenance) 및 공정 결과의 변동을 이해하고 자동적으로 제어하는 기술(Advanced process control)의 개발에서 중요한 역할을 할 것으로 기대 된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(20006471, 20006499, 20006534)와 KSRC 지원 사업인 미래반도체소자 원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었으며, Brain Korea 21 Four Program (No.4199990314119)와 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 2020년도 미래선도형 융합연구단 사업(No. CRC-20-01-NFRI)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Fukasawa, M. et al., "Prediction of Fluctuations in Plasma-Wall Interactions Using an Equipment Engineering System", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, p. 08HC01,

- 2009.
2. Pan, C. R. et al., "Scheduling cluster tools in semiconductor manufacturing: recent advances and challenges", IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., Vol. 15, pp. 586-601, 2018.
3. Jang, Y. et al., "Role of Features in Plasma Information Based Virtual Metrology (PI-VM) for SiO₂ Etching Depth", Journal of KSDT, Vol. 18, No. 4, pp. 30-34, 2019.
4. Lynn, S. et al., "Virtual Metrology for Plasma Etch Using Tool variables," in IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp. 143-148, 2009.
5. Khan, A. A. et al., "An approach for factory-wide control utilizing virtual metrology", IEDD Trans. Semicond. Manuf. Vol. 20, pp. 364-375, 2007.
6. Park, S. et al., "Enhancement of the Virtual Metrology Performances for Plasma-Assisted Oxide Etching Processes by Using Plasma Information (PI) Parameters", IEEE Trans. on Semicond. Manuf. Vol. 28, pp. 241-246, 2015.
7. Roh, H.-J. et al., "Development of the Virtual Metrology for the Nitride Thickness in Multi-Layer Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition Using Plasma Information Variables", IEEE. Trans. on Semicond. Manuf. Vol. 31, No. 2, pp. 232-241, 2018.
8. Jang, Y. et al., "Characteristics of a plasma information variable in phenomenology-based, statistically-tuned virtual metrology to predict silicon dioxide etching depth", Curr. Appl. Phys. Vol. 19, pp. 1068-1075, 2019.
9. Fants, U., "Basics of plasma spectroscopy" Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 15, S137-147, 2006.
10. Park, S. et al., "Characteristics of a Non-Maxwellian Electron Energy Distribution in a Low-pressure Argon Plasma", J. Kor. Phys. Soc., Vol. 64, No. 12, pp. 1819-1827, 2014.
11. Lopaev, D. V. et al., "Actinometry of O, N and F atoms" J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 50, 075202, 2017.
12. Skoro N. et al., "Characterization and global modelling of low-pressure hydrogen-based RF plasmas suitable for surface cleaning processes" J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 46, 475206, 2013.

접수일: 2021년 12월 3일, 심사일: 2021년 12월 13일,
게재확정일: 2021년 12월 13일