

VHF-CCP 설비에서 Ar/SF6 플라즈마 분포가 Si 식각 균일도에 미치는 영향 분석

임성재* · 이인규* · 이하늘* · 손성현* · 김곤호**

*† 서울대학교 에너지시스템공학부

Analysis of Si Etch Uniformity of Very High Frequency Driven – Capacitively Coupled Ar/SF6 Plasmas

Seongjae Lim*, Ingyu Lee*, Haneul Lee*, Sung Hyun Son* and Gon-Ho Kim**†

**†Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

The radial distribution of etch rate was analyzed using the ion energy flux model in VHF-CCP. In order to exclude the effects of polymer passivation and F radical depletion on the etching. The experiment was performed in Ar/SF6 plasma with an SF6 molar ratio of 80% of operating pressure 10 and 20 mTorr. The radial distribution of Ar/SF6 plasma was diagnosed with RF compensated Langmuir Probe(cLP) and Retarding Field Energy Analyzer(RFEA). The radial distribution of ion energy flux was calculated with Bohm current times the sheath voltage which is determined by the potential difference between the plasma space potential (measured by cLP) and the surface floating potential (by RFEA). To analyze the etch rate uniformity, Si coupon samples were etched under the same condition. The ion energy flux and the etch rate show a close correlation of more than 0.94 of R² value. It means that the etch rate distribution is explained by the ion energy flux.

Key Words : VHF-CCP, Electronegative plasma, Dry etch, Etch rate, Ion energy flux, Etch uniformity, and Semiconductor manufacturing

1. 서 론

용량성 결합 플라즈마(CCP)설비는 반도체 건식 식각 공정에서 널리 사용되는 설비 중 하나이다.[1,2] CCP설비는 이온의 에너지와 플럭스를 독립적으로 제어하기 위해 저주파와 고주파를 함께 사용하는 이중 주파수 CCP 설비로 발전되었다.[1] 생산성을 높이기 위해, 이온 밀도를 제어하는 고주파는 초 고주파(VHF)를 사용하는 방향으로 개발되었고, 인가 주파수의 파장이 전극의 크기와 유사해지면서 전자기 효과(electromagnetic effect)에 의해 플라즈마

불균일이 심화되었다.[3,4] 대면적 건식 식각 공정에서 식각 균일도는 공정 수율을 결정하는 중요한 인자 중 하나이므로, 식각 균일도 개선을 위해 다양한 연구가 진행되

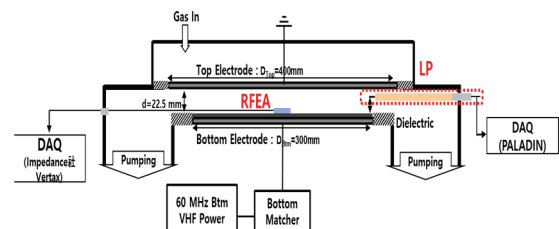


Fig. 1. Schematic diagram of VHF-CCP chamber with diagnostic tools.

†E-mail: ghkim@snu.ac.kr

었다.[5-7] 공정 균일도에 관련된 고질적인 문제 중 하나는 웨이퍼 가장자리에서의 식각률 저하 문제이다.[7]

플라즈마 건식 식각 공정에서 물질의 식각은 하전 입자의 물리적 에너지에 의한 식각과 화학종 들의 표면 반응에 의한 식각의 조합으로 이루어지므로, 식각 균일도를 제어하기 위해서는 식각 공정에 대한 이해가 선행되어야 한다. 플라즈마 내 이온은 쉬스 전기장에 의해 식각 대상 물질 표면의 수직방향으로 가속되어 입사하며, 물리적 에너지를 전달하고 표면 반응을 촉진시킨다. 따라서 식각률은 대상 물질로 입사되는 이온의 플럭스와 이온이 입사하면서 전달하는 에너지의 곱인 이온 에너지 플럭스(Γ_E)와 비례하는 관계를 가진다.[8]

본 연구에서는 전자기 효과가 심화된 장비 구조와 운전 조건에서 플라즈마의 불균일도가 식각 불균일도에 미치는 영향을 연구하였다. 본 연구를 위해서 이온 에너지 플럭스 모델을 사용하였고, 물리적 식각 모델에 집중하기 위해 passivation이 적은 Ar/SF6 플라즈마를 사용하였다. 이온 에너지 플럭스 모델은 Bohm 이온 전류와 이온의 운동 에너지의 값으로 아래와 같다.

$$\Gamma_E \approx J_{is} E_i \quad (1)$$

여기서 Γ_E 은 이온 에너지 플럭스, J_{is} 은 플라즈마-쉬스 경계에서 입사하는 이온의 Bohm 플럭스, E_i 는 웨이퍼 표면으로 입사하는 이온의 평균 에너지이다. 1996년 Lieberman이 발표한 전기 음성 플라즈마(Electronegative plasma) 쉬스 모델에 따르면 쉬스로 입사하는 이온의 플럭스는 다음과 같이 구할 수 있다.[9]

$$J_{is} \approx e h_i n_{e0} u_B \quad (2)$$

여기서 h_i 은 전기 음성 플라즈마의 center to edge ratio, n_e 는 공간 플라즈마의 전자 밀도, $u_B = (eT_e/M)^{1/2}$, T_e 는 전자 온도, M 은 양이온의 질량이다.

본 연구조건에서 이온-중성자간 평균 충돌 거리는 쉬스 두께보다 크기 때문에 쉬스 내에서 가속되는 이온은 중성자와의 충돌 없이 웨이퍼 표면으로 입사한다. 따라서 웨이퍼 표면으로 입사하는 이온의 에너지는 쉬스 전압으로 표현할 수 있으며, 쉬스 전압은 플라즈마 전위와 표면 전위의 차로 구할 수 있다.

$$E_i \approx V_{s/h} = V_p - V_{surf} \quad (3)$$

여기서 V_p 는 플라즈마 전위, V_{surf} 는 전극 표면 전위이다. 따라서 식 (1)에 식 (2),(3)을 대입하면 다음과 같이 플

라즈마 인자를 통해 이온 에너지 플럭스를 구할 수 있다.

$$\Gamma_E \approx e h_i n_{e0} u_B (V_p - V_{surf}) \quad (4)$$

기존의 이온 에너지 플럭스를 이용한 식각 연구는 평균 식각률 또는 식각 프로파일을 해석하는데 주로 사용되었다.[8,10] 본 연구는 이온 에너지 플럭스를 식각 균일도 관점으로 접근하였다. 따라서 식 (4)의 각 인자를 반경 방향의 식으로 확장하여 분석에 활용하였다. 즉, $n_{e0}(r)$, $V_p(r)$, $V_{surf}(r)$ 의 균일도가 식각 균일도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해서 장비 구조 및 운전 조건이 균일도에 미치는 영향을 판단하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치 및 플라즈마 진단계

실험은 Fig. 1과 같이 400 mm 지름을 가진 상부 전극과 300 mm 지름을 가진 하부 전극으로 이루어진 CCP장치에서 진행되었다. 하부 전극 주변으로 에지링(Edge ring)이 감싸고 있다. 전극 사이의 거리는 22.5 mm로 좁게 구성되어 있으며, 상부 전극은 접지되어 있고 하부 전극을 통해 60 MHz 전원이 인가된다. 전자 온도, 전자 밀도, 플라즈마 전위를 측정하기 위해 길이 2.5 mm 직경 1 mm인 텅스텐 팁을 가진 보상형 랭뮤어 프로브(cLP)를 사용하였다. cLP를 이용하여 웨이퍼 표면에서부터 11 mm 위로 떨어진 지점에서 플라즈마를 진단하고, 여기서 얻은 플라즈마 전위를 쉬스 전압을 계산할 때 사용한다. 웨이퍼 표면 부유 전위를 측정하기 위해서 Retarding Field Energy Analyzer(RFEA, Impedans, Vertex)에서 얻어지는 self-bias 값을 사용하였다. cLP와 RFEA는 설비 외부에 설치된 리니어 가이드를 이용하여 반경 방향으로 이동하며 웨이퍼 상단에서의 플라즈마 반경 방향 분포를 진단하였다. cLP는 전극 중심 0 mm부터 가장자리 200 mm까지 10 mm 간격으로 진단하였고, RFEA는 전극 크기의 한계로 전극 중심 0 mm부터 140 mm까지 10mm 간격으로 진단하였다.

2.2 실험 조건 및 식각률 측정 방법

실제 공정에서 사용되는 플라즈마는 탄소 원자가 포함된 CxFy계열의 가스를 사용하여 식각 프로파일 표면에 폴리머 passivation층을 형성시켜 측면 방향의 식각을 억제한다. 하지만 폴리머 passivation 층의 분포 또한 식각률 분포에 영향을 미치므로 이온에 의한 식각률 분포의 영향성만을 파악하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 탄소원자가 포함된 화학종에 의한 표면 passivation효과를 제거하고 이온이 식각에 미치는 영향만을 확인하기 위해 Ar/SF6

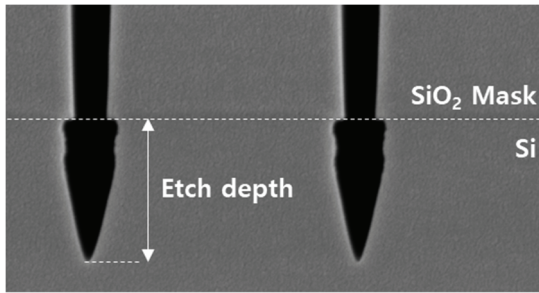


Fig. 2. Cross section SEM image of etched coupon sample. The etch depth is the length from the SiO₂ mask-Si boundary to the etch front.

이중 가스로 식각 실험을 진행하였다. 또한 식각 대상 표면에 F 라디칼을 충분히 공급하기 위해 SF₆가스의 몰비율(Molar fraction)이 80%가 되도록 Ar/SF₆가스비를 설정하여 F 라디칼 부족에 의한 식각률 변동을 줄이고자 하였다. 실험조건으로 50 sccm Ar과 120 sccm SF₆ 혼합가스를 상부 shower head를 통해 분사하고 하부 전극에 600W인가하여 플라즈마를 방전시켰다. 전자 밀도 분포를 변경시키기 위해 20 mTorr와 10 mTorr 두가지 압력 조건에서 실험을 진행하였다. 식각 결과 확인을 위해 높이 2 μm 이고 너비 200nm 인 SiO₂ Trench pattern 마스크로 구성된 Si시편을 실험과 동일 조건으로 5분간 식각 하였다. 실험 조건 하에서 반경 방향 식각 결과 분포를 확인하기 위하여 전극 중심 0 mm에서부터 전극 가장자리 150 mm까지 10 mm 간격으로 시편을 배치하고, 실험 조건으로 5분간 식각을 진행하였다. Fig 2는 식각 된 시편의 단면을 SEM을 이용해 측정 한 이미지이다. 식각률은 Si - SiO₂ 마스크 경계에서부터 총 식각 된 깊이를 측정 한 뒤 공정시간으로 나누어 계산하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 플라즈마 분포

Fig 3(a)는 cLP를 이용해 측정한 압력에 따른 전자 온도의 반경 방향 분포이다. 10 mTorr에서 20 mTorr로 압력이 증가함에 따라 전자와 중성종 간 충돌 확률이 증가하여 평균 전자 온도가 감소한다. 반경 방향 전자 온도는 비교적 균일한 값을 갖는데, 이는 저압 Ar/SF₆ 플라즈마의 전자 Energy relaxation length가 전극 크기보다 커서 국부적으로 가열된 전자가 다른 전자와 에너지를 충분히 교환하였기 때문이다. [11]

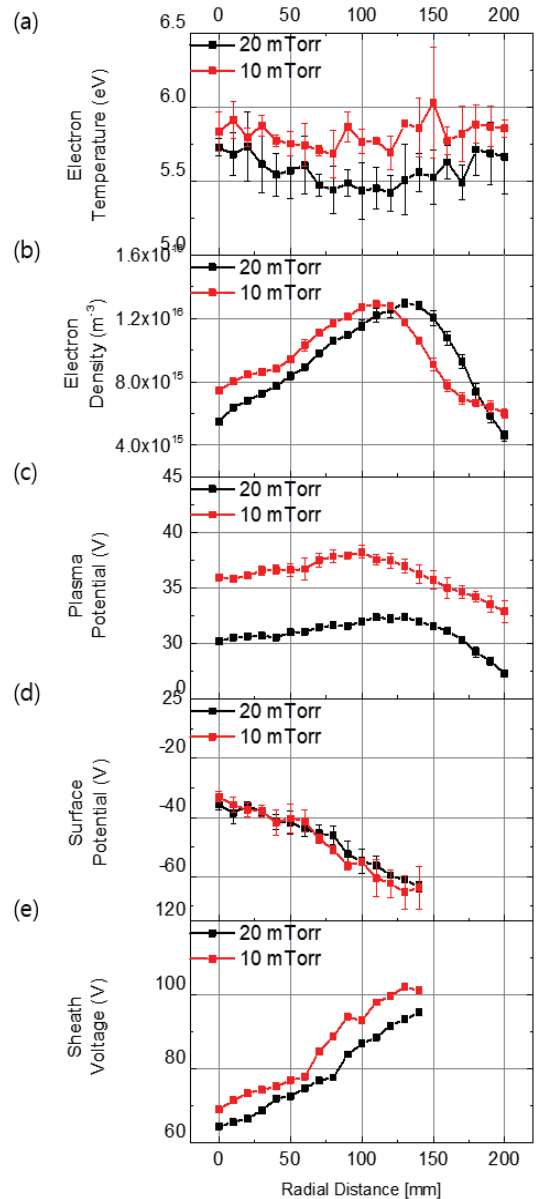


Fig. 3. Radial distribution of plasma parameters for each pressure (a) Electron temperature, (b) Electron density, (c) Plasma potential, (d) Surface potential, (e) Sheath voltage.

Electron temperature, electron density, and plasma potential were measured by cLP, and surface potential was measured by RFEA, and sheath voltage was calculated using equation (3)

Fig. 3(b)는 cLP로 측정된 압력 별 전자 밀도의 분포를 보여준다. 전극 중심에서 가장자리로 갈수록 전자 밀도는 증가하다가 전자 밀도 피크 이후 위치에서는 전자가 전극 외부로 탈출하면서 감소하게 된다. 20 mTorr 조건의 경우 130 mm에서 가장 높은 전자 밀도를 갖고, 10 mTorr 조건으로 압력이 낮아지면 밀도 분포의 피크 위치가 전극 안쪽 110 mm 로 이동하는 것이 관찰된다. 10 mTorr에서 전극 밀도 피크 위치가 이동한 이유는 압력 감소에 따라 전자의 평균 자유 행로(Mean free path)가 길어지면서 전극을 탈출할 수 있는 범위가 확장되고, 음이온화가 중심부로 집중되고 있기 때문으로 판단된다. 압력이 10 mTorr에서 20 mTorr 로 증가함에 따라 전자 밀도의 크기는 감소하였다. 따라서 전기 음성 플라즈마(Electronegative plasma)의 전자 부착(electron attachment)에 의한 효과가 공간에서 플라즈마 밀도 분포에 영향을 미치고 있음이 확인되었다. 전기 음성 플라즈마에서 전자의 생성률(S_e)은 다음과 같다.[2]

$$S_e = k_{iz}(T_e)n_g n_e - k_{att}(T_e)n_g n_e \quad (5)$$

여기서 k_{iz} 는 이온화율 계수, k_{att} 는 전자 부착률 계수, n_g 는 중성자 밀도이다. SF6 플라즈마에서 대표적인 이온화 반응인 $e + SF_6 \rightarrow SF_5^+ + F + 2e$ 반응의 threshold 에너지는 16eV 이고, 대표적인 전자 부착 반응인 $e + SF_6 \rightarrow F^- + SF_4 + F$ 반응의 threshold 에너지는 5.4eV 으로[12] 이온화 에너지는 전자 부착에 필요한 에너지 보다 크다. Fig. 3(a)에서 관측한 것과 같이 압력 증가에 의해 전자 온도는 감소하므로, 압력 증가 시 이온화를 감소가 전자 부착률 감소량보다 커져 운전 압력을 높이면 전체 전자 밀도가 감소하는 현상을 보이게 된다.

Fig. 3(c)는 cLP로 측정된 압력에 따른 플라즈마 전위의 반경 방향 분포이다. 플라즈마 전위는 볼츠만 관계식(Boltzmann relation)에 의해 결정되므로, 전자 밀도 분포와 유사하게 전극 중심에서 가장자리로 갈수록 플라즈마 전위는 증가하다가 일정 위치에서 피크값을 가진 뒤 감소한다. 20 mTorr의 전자온도가 10 mTorr 보다 작기 때문에 플라즈마 전위 크기의 감소가 발생하였다. 이는 플라즈마가 충분히 열 평형 상태를 가지고 반경 방향 분포를 하고 있음을 보여준다.

Fig. 3(d)는 RFEA로 측정된 웨이퍼의 표면의 부유 전위, RF 플라즈마에서 표면에 형성되는 self-bias 값의 분포를 보여준다. 전극 중심에서부터 가장자리로 갈수록 음의 방향으로 증가하는 경향을 갖는다. 표면 전위의 분포는 narrow gap CCP 설비의 구조적인 특성에 의해 결정된다. Self-bias 효과로 전극에 charge-up 된 전하는 전극 주변 에 지령 또는 상부 전극과 같은 구조물과의 상호작용에 의

해 분포가 결정된다.[13]

이온이 쉬스 내에서 가속 받는 에너지는 식 (3)과 같이 플라즈마 전위와 표면전위와의 차이므로 쉬스 전압은 Fig. 3(e)와 같이 분포한다. 쉬스 전압의 분포는 표면 전위의 분포에 의해 크게 결정되고, 전자 온도에 의한 플라즈마 전위의 크기 차이에 의해 쉬스 전압 크기 차이가 발생한다.

Fig. 4는 식 (4)를 이용하여 계산한 이온 에너지 플럭스의 압력 별 반경 방향 분포이다. 전극 중심에서 반경방향으로 갈수록 이온 에너지 플럭스의 값이 증가하며, 전자 밀도 분포와 유사하게 10 mTorr 조건의 경우 110 mm 부근에서 최대값을 갖는다. 또한, 쉬스 전압과 전자 밀도의 크기에 의해 예측된 것과 같이 10 mTorr 조건의 평균 이온 에너지 플럭스 값이 20 mTorr 조건보다 크다. 이온 에너지 플럭스를 이용해 식각 분포를 예상해 보면, 20 mTorr 대비 10 mTorr 조건의 식각률이 크고, 10 mTorr 조건에서 110 mm 부근 이후 위치에서는 식각률이 떨어져 웨이퍼 가장자리 식각률 감소가 발생할 것으로 예상할 수 있다.

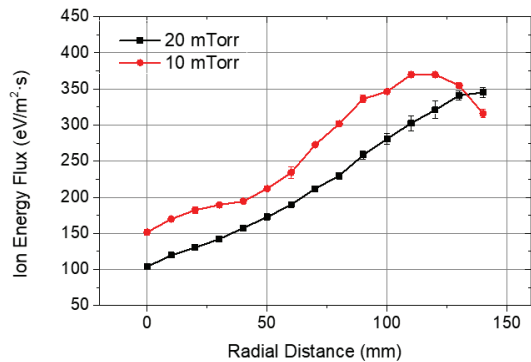


Fig. 4. Radial distribution of ion energy flux for each pressure.

3.2 식각률 분포와 비교

이온 에너지 플럭스 분포로 예측한 식각 균일도를 검증하기 위해 플라즈마 진단 조건과 동일한 조건에서 5분간 Si 시편의 식각을 진행하였다. Fig 5는 압력 별 식각률 분포를 보여준다. 이온 에너지 플럭스로 예상한 것과 같이 20 mTorr에서 10 mTorr로 압력 감소에 따라 평균 식각률은 증가하고, 식각 균일도는 개선되었으나 웨이퍼 가장자리에서의 식각률 감소 현상이 발생하는 것을 확인하였다. Fig. 6은 반경 방향 위치 별 계산한 이온 에너지 플럭스와 해당 위치에서의 식각률 간 관계를 보여 준다. 두 항목은 Adj. R² 0.94 이상의 상관관계를 가져 이온 에너지 플럭스로 식각률 분포를 예측할 수 있음을 알 수 있다. 이온 에

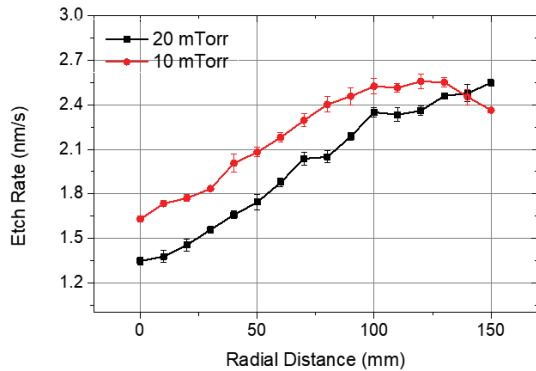


Fig. 5. Radial distribution of etch rate of Si coupon sample for each pressure.

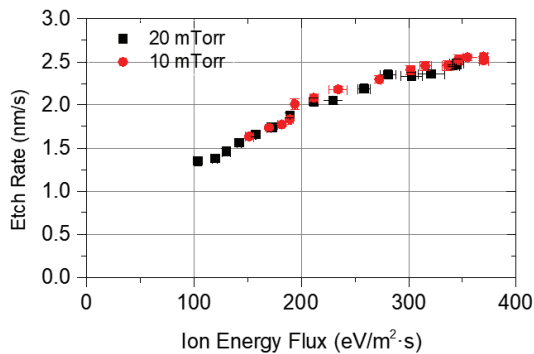


Fig. 6. Comparison of ion energy flux and etch rate. The ion energy flux and the etch rate had a correlation of more than 0.94 for Adj. R^2 .

너지 플럭스가 증가하면서 식각률 증가 기울기가 미약하게 감소 하는데, 이는 식각 깊이가 증가에 따라 패턴 내로 입사되는 이온 플럭스의 양이 감소하게 되어 발생하는 ARDE 효과로 판단된다.[6-7] 이 결과를 통해 위치 별 이온 에너지 플럭스로 각 위치의 식각률을 예측할 수 있으며, 압력 변화에 의해 에너지 플럭스 분포 개형이 변해도 식각률을 잘 예측함을 보여준다. 또한 통해 웨이퍼 가장자리의 식각률 감소는 압력 감소에 의한 전자 평균자유행로 증가에 의해 유발됨을 확인하였다.

4. 결 론

VHF-CCP 설비에서 이온 에너지 플럭스를 이용하여 식각률 분포 결과를 해석하였다. 폴리머 passivation과 F 라디칼 부족이 식각에 미치는 영향을 배제하고, 이온에 의한 식각 효과만을 확인하기 위해 SF₆의 몰비율이 80%

인 Ar/SF₆ 플라즈마에서 실험을 진행하였다. VHF-CCP 설비 내 반경 방향 불균일하게 분포된 플라즈마에 의해 이온 에너지 플럭스는 반경 방향 분포가 존재한다. 압력 조건 변경에 의한 이온 에너지 플럭스의 크기는 전자 온도, 분포는 전자 밀도 분포가 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 실제 시편 식각을 통해 구한 식각률과 이온 에너지 플럭스를 비교한 결과 Adj. R^2 0.94 이상의 상관 관계를 가짐을 확인하였다. 운전 압력은 현재 장비 구조의 운전 조건에서 균일도에 미치는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 압력 감소에 의한 전자 온도 증가로 쉬스 전압이 증가하여 평균 식각률이 증가하였고, 전자의 평균 자유 행로가 증가하면서 식각 균일도는 개선되었다. 하지만, 전극 가장자리에서 전극 외부 넓은 공간으로 전자 이탈 영역이 확대되고, 이 현상이 전극 내로 확장되며 웨이퍼 가장자리의 식각률 감소가 발생하였다. 따라서 전자의 거동이 식각률의 크기와 분포에 모두 영향을 미침을 확인하였다. 본 연구를 통해 이온 에너지 플럭스로 식각 균일도를 해석할 수 있음을 확인하였으며, 전자 평균 자유 행로 증가에 의한 전자 이탈 영역의 확장이 전극 가장자리의 식각률 감소를 열화 시키는 원인 중 하나임을 밝혔다. 아울러 장비 구조와 운전 조건과 입력 가스의 충돌률이 식각 균일도에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 이로부터 플라즈마 정보인자(PI) 기반의 VM(균일도 가상 예측 모델)의 개발 전략을 구축 할 수 있을 것이며, 이를 활용 하여 식각 균일도 개선 방법을 모색 할 수 있을 것이다.[14-15]

감사의 글

이 논문은 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 2020년도 미래선도형 융합연구단 사업 (No. CRC-20-01-NFRI) 및 BK21플러스 사업(No. 4199990314119) 및 산업통상자원부(20006534)와 KSRC 지원 사업인 미래반도체소자 원천기술개발사업에서 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Vincent M. Donnelly, and Avinoam Kornblit., "Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow," J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 31, 050825, (2013).
2. Michael A. Lieberman and Allan J. Lichtenberg., Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, WILEY, pp. 327-386, 424-494 (2005).
3. M A Lieberman, J P Booth, P Chabert, J M Rax, and M M Turner., "Standing wave and skin effects in large-area, high frequency capacitive discharges," Plasma Sources

- Sci. Technol, Vol. 11, pp. 283-293, (2002)
4. P Chabert., "Electromagnetic effects in high-frequency capacitive discharges used for plasma processing," J. Phys. D: Appl. Phys, Vol. 40 pp. 63-73 (2007)
 5. Konstantinos P. Giapis, Geoffrey R. Scheller, Richard A. Gottscho, William S. Hobson, and Yong H. Lee, "Microscopic and macroscopic uniformity control in plasma etching," Appl. Phys. Lett, Vol. 57 pp. 983-985 (1990)
 6. Banqiu Wu, Ajay Kumar, and Sharma Pamarthy, "High aspect ratio silicon etch: A review," J. Appl. Phys, Vol. 108, 051101 (2010)
 7. Chris G N Lee, Keren J Kanarik and Richard A Gottoscho, "The grand challenges of plasma etching: a manufacturing perspective," J. Phys. D: Allp. Phys, Vol. 47, 273001 (2014)
 8. J. Ding, J.S. Jenq, G.H. Kim, L. Maynard, J. S. Hamers, N. Hershkowitz and J. W. Taylor, "Etching rate characterization of SiO2 and Si using ion energy flux and atomic fluorine density in a CF4/O2/Ar electron cyclotron resonance plasma," J. Appl. Sci. Technol. A. Vol. 11, pp 1283-1288 (1993)
 9. I G Kouznetsov, A J Lichtenberg, and M A. Lieberman, "Modelling electronegative discharges at low pressure," Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 5, pp. 662-676, (1996)
 10. Barbara Abraham-Shrauner and Chungdar Daniel Wang, "Model of etching profiles for ion energy flux dependent etch rates in a collisionless plasma sheath," J. Appl. Phys., Vol. 77 pp. 3445-3449, (1994)
 11. Pascal Chabert and Nicholas Braithwaite, Physics of Radio-Frequency Plasmas, CAMBRIDGE, pp40-41, (2011)
 12. L Lallement, A Rhallabi, C Cardinaud, M C Peignon-Fernandez and L L Alves, "Global model and diagnostic of a low-pressure SF6/Ar inductively coupled plasma," Plasma Sources Sci. Technol. Vol. 18, 025001 (2009)
 13. Shahid Rauf, Kallol Bera and Ken Collins, "Self-consistent simulation of very high frequency capacitively coupled plasmas," Plasma Sources Sci. Technol. Vol. 17, 035003 (2008)
 14. Yun Chang Jang, Seol Hye Park, Sang Min Jeong, Sang Won Ryu and Gon Ho Kim, "Role of Features in Plasma Information Based Virtual Metrology(PI-VM) for SiO2 Etching Depth," J of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 18, pp 30-34 (2019)
 15. Jiwon Kwon, Sangwon Ryu, Jihoon Park, Haneul Lee, Yunchang Jang, Seolhye Park and Gon Ho Kim, "Development of Virtual Metrology Using Plasma Information Variables to Predict Si Etch Profile Processed by SF6/O2/Ar Capacitively Coupled Plasma," Materials, Vol. 14, 3005 (2021).

접수일: 2021년 11월 8일, 심사일: 2021년 11월 25일,
 게재확정일: 2021년 11월 25일