

PI-VM을 이용한 용량 결합 Ar/SF₆/O₂ 플라즈마에서의 전력 인가 에지 링 식각 특성 조사

이현주* · 송재민* · 박태준* · 김남균** · 김곤호**

**서울대학교 에너지시스템공학부, **삼성전자 설비기술연구소

Investigation of Etching Characteristics for Powered Edge-Ring Utilizing PI-VM in Capacitively Coupled Argon/SF₆/O₂ Plasma

Hyunju Lee*, Jaemin Song*, Taejun Park*, Nam-Kyun Kim** and Gon-Ho Kim**†

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

**Mechatronics R&D Center, Samsung Electronics Co., Ltd.

ABSTRACT

The edge ring placed on the outside of the electrostatic chuck (ESC) is a key component for protecting the ESC and controlling the etching uniformity of the edge of the wafer. Therefore, it is very important to understand the etching phenomenon of edge rings for edge ring management and equipment homeostasis. In this study, a specimen with SiO₂ hard mask and underlying Si mold was installed on the edge ring surface and the etching results were measured by varying the edge ring 2MHz RF power. By developing PI-VM model with high prediction accuracy and analyzing the roles of key parameters in the model, we were able to evaluate the effect of plasma and sheath characteristics around the edge ring on edge ring erosion. This analysis method provided information necessary for edge ring maintenance and operation.

Key Words : Plasma information (PI), Edge ring, Capacitively coupled plasma (CCP), Virtual metrology (VM)

1. 서 론

플라즈마를 이용하는 반도체 건식 식각 공정에서는 정전척(Electrostatic Chuck; ESC)의 보호와 웨이퍼 가장자리 영역의 식각 균일도 조절을 위해서 ESC 외곽에 에지 링(edge ring)을 사용한다. 포커스 링(focus ring)이라고도 불리는 에지 링은 식각 플라즈마와 대면하고 있기 때문에 설비 운용 시간이 누적됨에 따라 스퍼터링에 의해 그 두께가 지속적으로 감소한다. 이는 웨이퍼 가장자리의 공정 드리프트를 유발할 수 있기 때문에 에지 링은 주기적으로 교체가 필요하며, 교체 주기를 늘리기 위해 에지 링이 부식된 만큼 그 높이를 조절하는 운영 방법을 사용하

도 한다[1]. 최신 건식 식각 공정에서는 반도체 제조 수율을 극한으로 끌어올리기 위해서, 웨이퍼 가장자리의 쉬스(sheath) 전기장을 조절하는 목적으로 에지 링의 RF 특성을 변화시키거나[2] 독립적인 전력을 인가한다. 따라서 설비 항상성 유지 및 공정 수율 관리에 있어 에지 링 주변의 플라즈마와 에지 링 식각 상태에 대한 예측은 매우 중요하다.

공정 결과와 플라즈마 상태를 예측하기 위해서 가상계측(Virtual Metrology; VM) 방법이 개발되어 왔다. Cheng은 반도체 산업의 전반적인 장비 효율을 증진시키기 위한 하나의 전략으로서 장비 데이터와 센서 데이터를 이용하여 웨이퍼의 공정 특성을 예측하는 방법인 VM을 제안하였다[3]. 최신 연구는 VM이 다양한 공정 환경에 대응하기 위해서 공정 상태를 모니터링하는 인자를 포함해야 함을

†E-mail: ghkim@snu.ac.kr

밝혔고, 플라즈마 정보(Plasma Information; PI) 데이터를 이용한 PI-VM 알고리즘이 제시되었다[4,5]. PI-VM은 공정에 기여할 수 있는 플라즈마 인자들, 예를 들어 전자와 이온, 라디칼에 대한 정보 등을 PI 변수로 정의하고 이를 입력 데이터 세트에 포함시킨 가상 예측 모델이다. 따라서 플라즈마를 이용하는 공정에서 운전 조건 및 챔버 상태 변화에 따른 공정 플라즈마 변화의 정보를 데이터화 하여 모델링에 활용함으로써, 더 나은 성능으로 공정 진행 과정을 모니터링하고 결과를 예측할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 에지 링의 식각 현상을 관찰하기 위해 PI-VM을 적용한다. 단, 본 연구에서의 에지 링은 세라믹으로 구성되어 있어, 식각 가속화 모사를 위해 Si와 SiO₂ 막질의 패턴을 이용한다. 에지 링 표면에 쿠폰을 두어 식

각률을 관찰하고, 플라즈마를 진단하여 얻은 PI 데이터와 장비 데이터를 이용하여 가상 예측을 진행한다. 이를 통해 에지 링 식각 현상을 지배하는 주요 인자를 확보하고 에지 링 표면의 식각률을 예측할 수 있다. 논문 구성은 다음과 같다. 2장 실험 방법에서는 에지 링을 포함한 실험 장치와 공정 실험을 소개한다. 3장에서는 하드 마스크인 SiO₂의 식각률과 하부 Si 막질의 식각률에 대한 실험 결과와 모델의 예측 결과를 비교하고, 주요 PI 인자를 구성하는 플라즈마 특성에 대해 논의했다. 본 논문에서 사용된 PI-VM은 기존에 발표된 Jang(2019)의 개발 방법을 따라 개발했다. 상세한 내용은 해당 논문을 참조하기 바라며, PI-VM 개발에 사용된 입력 데이터 세트는 Table 1에 정리했다. 4장에는 본 연구의 결론을 정리하였다.

Table 1. Input Dataset for PI-VM .

Category	Parts	Variable	Description	
EES	60MHz RF Generator	P_{60M}	Forward Power (W)	
		Bottom RF Matcher	$C1_{60M}$	Load Capacitor Position (%)
	$C2_{60M}$		Tune Capacitor Position (%)	
	Edge 2MHz RF Generator	Edge RF Matcher	V_{60M}	Vrms (V)
			I_{60M}	Irms (A)
			ϕ_{60M}	Phase Diff. between V & I (deg)
			BTM_Zmag	Impedance Magnitude (Ohm)
			BTM_Zre	Impedance Real Value (Ohm)
			BTM_Zim	Impedance Imaginary Value (Ohm)
			P_{Edge2M}	Forward Power (W)
			$C1_{Edge2M}$	Load Capacitor Position (%)
	$C2_{Edge2M}$	Tune Capacitor Position (%)		
	V_{Edge2M}	Vrms (V)		
	I_{Edge2M}	Irms (A)		
	ϕ_{Edge2M}	Phase Diff. between V & I (deg)		
	EDGE_Zmag	Impedance Magnitude (Ohm)		
	EDGE_Zre	Impedance Real Value (Ohm)		
	EDGE_Zim	Impedance Imaginary Value (Ohm)		
Sensor / PI	ESC (TL Theory)	V60M_ESC	Vrms (V)	
		I60M_ESC	Irms (A)	
	Langmuir Probe	V_plasma	Plasma Potential (V)	
		I_electron	Electron Current (A)	
		T_e	Electron Temperature (eV)	
		n_e	Electron Density (cm ⁻³)	
	RFEA	I_i	Ion Current (A)	
		$V_{surface}$	Surface Potential (V)	
	LP, RFEA	V_{sheath}	Sheath Potential (V)	
		Eflux	Energy Flux	
	OES	ne_OES	Electron Density (cm ⁻³)	
		Teff_OES	Effective Temperature (eV)	
		b_OES	b factor for EEDF	
		nF_OES	F Radical Density	
	nO_OES	O Radical Density		

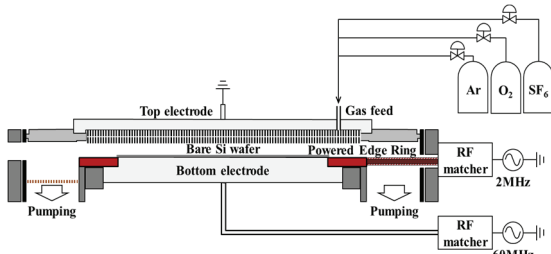


Fig. 1. Cross-sectional schematic diagram for the CCP etcher.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치 및 플라즈마 진단계

실험은 Fig. 1과 같이 고주파(VHF)를 사용한 용량 결합 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma; CCP) 식각 설비를 이용하여 진행하였다. 상부 전극에는 샤워헤드(showerhead)를 장착하고 접지하였으며, 하부 전극에는 60MHz 전력을 인가하였다. 상부와 하부 전극 사이는 약 22.5 mm의 간격을 유지했다. 운전 압력은 반응기 하단을 구성하는 압력 제어 밸브의 각도를 조절하여 공정 압력을 일정하게 유지했다. 웨이퍼 가장자리 영역에 대한 공정 산포를 제어하기 위해서 양극산화 알루미늄으로 제작되어 전력 인가가 가능한 에지 링을 설치하였다. 본 연구에서는 이를 전력 인가 에지 링(Powered Edge Ring; PER)이라고 명명하였으며, 2MHz의 RF 전력을 인가하였다. PER 위에는 SiO₂ 하드 마스크를 가진 Si 막질의 식각 쿠폰을 설치하고, SF₆/O₂/Ar 플라즈마에서 식각을 진행했다.

식각 공정이 진행되는 동안 여러 진단 도구들을 이용해서 전력 인가 에지 링 상단의 플라즈마 정보(Plasma Information; PI) 데이터를 얻었다. Fig. 2와 같이 PER 상단에 자체 제작한 Langmuir probe(LP)를 위치시키고, 에지 링 인가 전력에 따른 플라즈마 전자 온도와 밀도를 측정했다. LP 팁은 지름 0.2 mm에 2.5 mm 길이의 텅스텐으로 제작되었으며, 전극에 인가하는 RF 전력에 의해 신호가 왜곡되는 것을 방지하기 위해 RF 초크 필터를 가진다. 또한 RFEA(Retarding Field Energy Analyzer)를 이용하여 하부 전극 및 웨이퍼 표면에 입사되는 이온 에너지 및 표면 전위를 측정했다. RFEA의 직경은 50 mm, 두께는 5 mm이며, Impedans 사의 Vertex 제품을 이용하였다. OES(Optical emission spectroscopy)의 경우, 웨이퍼 상의 플라즈마 외에도 에지 링 위 플라즈마 특성도 함께 진단하기 위해 2개 채널로 구성된 ULS-2048L 모델을 이용하였다.

식각 결과를 평가하기 위해 이용한 패턴 웨이퍼는 2400 nm 높이의 SiO₂ 상부 마스크와 하부 Si의 적층 구조를 갖는다. 직경 300mm 웨이퍼에는 5mm×1.5mm 크기의 Hole

패턴 영역과 5mm×2mm 크기의 Trench 패턴 영역이 번갈아 배열되어 있다. 그 중에서 특히 Trench 패턴 영역은 약 100nm에서 250nm까지 30개 정도의 서로 다른 CD를 갖는 여러 개의 Trench들로 구성되어 있다. 공정 평가는 두 영역이 모두 포함되도록 약 7mm×7mm 크기의 쿠폰을 제작하여 진행하였으며, 정전적 중심을 기준으로 반경 175mm 위치에 쿠폰의 중심이 놓이도록 쿠폰을 부착시켰다. 이때 쿠폰의 가장자리에 형성되는 곡부 쉬스의 곡률 형성을 방지하기 위해서 Fig. 3과 같이 베어 실리콘 웨이퍼 조각으로 쿠폰을 둘러쌌다. 이를 통해 쉬스 곡률에 의한 이온의 입사각 왜곡을 최소화하였다[6].

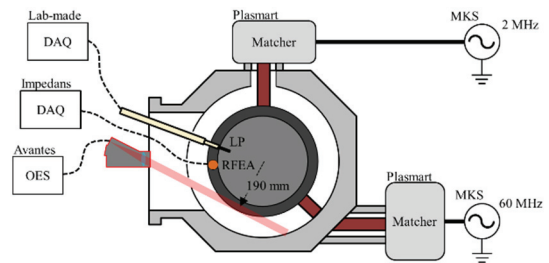


Fig. 2. Configuration of the diagnostic system installed in the experimental equipment.

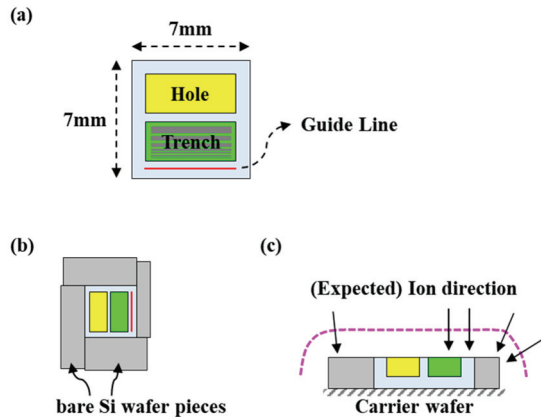


Fig. 3. (a) Schematic diagram of the specimen consisting of hole area and trench area. (b) Top and (c) side views showing that the specimen was surrounded by bare Si wafer pieces to prevent the formation of peripheral sheath curvature.

2.2 실험 조건 및 결과 분석 방법

공정 조건은 Ar 50sccm, O₂ 75sccm, SF₆ 120sccm의 유량에 압력은 20 mTorr로 고정하고, 하부 전극에 60MHz RF 전력을 700W 인가하여 300초 동안 식각을 진행하였다. 에지

링에는 2MHz RF 전력을 최대 150W까지 인가하였다. 실험에서 사용된 공정 플라즈마의 쉬스 두께는 Child-Langmuir 쉬스[7]를 가정하면 에지 링 전력이 0W일 때에도 약 0.5mm로, 패턴 CD(Critical Dimension)의 100배 이상이 되는 매우 큰 값을 갖는다.

식각이 완료되면 시편에 Pt 코팅을 진행하고 FESEM(Field-Emission Scanning Electron Microscope)을 이용하여 Vertical-SEM 이미지를 측정했다. Fig 4는 이미지 샘플을 보여 준다. 패턴 상단의 SiO₂ 마스크와 하단의 Si 식각 목표막질 사이의 경계를 기준으로 식각 후 남아있는 마스크의 높이를 'Mask Height'로, 식각되어 더욱 깊어진 Si mold의 깊이를 'Si Etch Depth'로 정의하였다. 계측 값 측정 시 자바 오픈소스인 ImageJ 프로그램을 사용하였으며, V-SEM 이미지는 시편 및 스테이지의 기울어짐 없이 얻어졌으므로 프로그램 상에서 비례 축소 후 계측한 값을 그대로 출력 데이터로서 사용하였다.

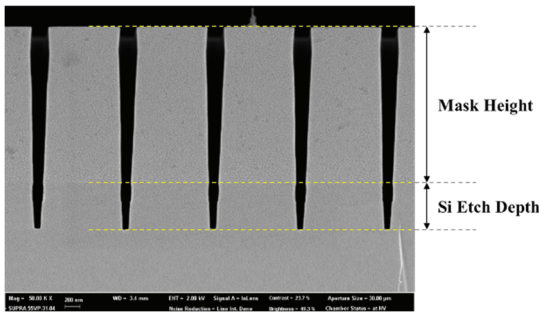


Fig. 4. V-SEM image of the evaluation specimen after the etching process and definition of 'Mask Height' and 'Si Etch Depth' measurements.

Table 1에는 입력 데이터 세트를 정리했다. 본 연구에서 데이터는 RF 매칭이 완료된 상태에서 얻었으므로 RF 전원의 반사 전력이나 RF 매치의 S11 값들은 제외하였다. 또한 하부 전극에 인가되는 60MHz RF 전력의 경우, 매치 출력 단에서 실제 공정이 진행되는 웨이퍼까지 매우 복잡한 구조를 통해 전달된다. 이에 RF 피드들의 형상을 단순화하여 전송선로 이론을 적용하고 ESC 단에서의 60MHz V_{rms} 와 I_{rms} 값을 계산하여 상대적으로 낮은 수준의 PI로서 사용하였다. 본 연구에서는 해당 변수들이 VM의 주요 인자로서 선택되지는 않았지만, 장비 정보를 배제한 변수이므로 단순히 매치 출력단에서 측정된 전압 값보다는 플라즈마 정보를 제공할 수 있는 인자가 된다.

플라즈마를 이용하는 공정에서 플라즈마 인자가 공정에 미치는 영향을 해석하고 예측하기 위해 PI-VM은 여러

가지 모델링 방법 중에서도 해석력이 높은 다중선형회귀(Multi Linear Regression; MLR) 분석 방법을 채택했다[5]. 공정 조절에 가장 민감한 인자들의 영향을 직관적으로 판단할 수 있기 때문이다. IBM에서 제공하는 SPSS 프로그램은 수많은 데이터를 가지고 여러 가지 통계 분석이 가능한데 [8], 본 실험에서는 이러한 SPSS 프로그램을 이용하여 다중선형회귀 분석을 진행하였다. 분석을 진행함에 있어 변수 선택법은 단계적 변수 선택(Stepwise Variable Selection; SVS) 방법을 이용하였으며, 공선성 진단을 통해 모델이 과적합 되지 않도록 주의하며 진행하였다. 공선성 진단은 분산 팽창 요인(Variance Inflation Factor; VIF) 값이 10을 넘지 않는지, 그리고 상태지수(Condition Index; CI) 값은 15를 넘지 않는지를 기준으로 하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 에지 링 위 시편 가상 계측 결과

식각 실험 결과인 SiO₂ 마스크의 식각 후 남은 높이와 Si 식각 깊이에 대해 얻은 공정 예측 모델은 각각 다음과 같다.

$$\text{MaskHeight} = \omega_1 V_{\text{Edge2M}} + \text{const.} \quad (1)$$

$$\text{MoldEtchDepth} = \omega_2 P_{\text{Edge2M}} + \text{const.} \quad (2)$$

여기서 V_{Edge2M} 는 PER에 인가된 2MHz RF의 매치 출력단 ms 전압 값, P_{Edge2M} 는 PWR에 인가된 전력의 크기를 나타낸다. 그리고 ω_1 과 ω_2 는 각 인자의 계수이다. 이때 두 선형회귀 모델들의 MAPE(Mean Absolute Percentage Error) 값은 남은 마스크의 경우 0.46, 식각 깊이의 경우 1.27로, 남은 마스크에서 특히 높은 정확성을 보였다. 이는 남은 마스크 높이는 쉬스 에너지에, 식각 깊이는 에지 링 전력 값에 민감함을 보여준다. 즉 Fig 5와 같이 에지 링 2MHz 전력을 높일수록 SiO₂ 마스크 식각이 심화되고 Si 식각량 또한 많아진다.

대부분의 플라즈마 설비들은 에지 링 표면을 SiC 등의 내식각성이 높은 소재로 코팅하여 사용한다. 웨이퍼 가장자리 공정 제어를 위해 에지 링의 RF 특성 변화를 이용하는 경우에도 마찬가지이다. 공정에 사용되는 식각 가스의 종류나 유량에 따라 에지 링의 식각량은 달라질 수 있으나, 바이어스 전력에 따른 식각률 변화 경향은 SiC와 Si가 동일하다[9,10]. 따라서 에지 링 또한 물리적 식각이 주요 식각 현상이라 할 수 있다[11].

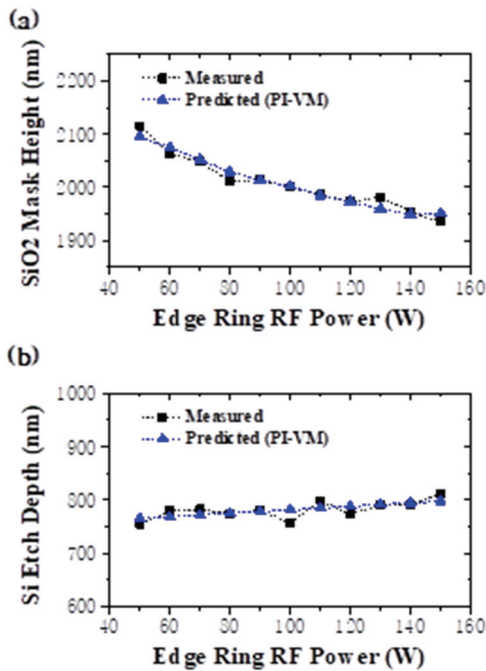


Fig. 5. PI-VM results for (a) SiO₂ Mask Height and (b) Si Etch Depth.

3.2 에지 링 상단 플라즈마 특성

에지 링에 인가되는 2MHz 전력이 현상학적으로 에지 링 식각에 미치는 영향을 확인하기 위해서, 에지 링 인가 전력을 변화시키며 에지 링 상단에 형성되는 플라즈마 밀도와 쉬스 DC 전위 변화를 관찰하고 이를 Fig 6에 정리했다. 2MHz 전력은 0W, 그리고 50W부터 150W까지는 10W씩 증가시키며 인가하였다. Fig 6의 (a)에는 플라즈마 전자 밀도, (b)는 플라즈마 이온 밀도, (c)는 쉬스 퍼텐셜(플라즈마 전위와 RFEA로 측정된 부유 전위의 차), 그리고 (d)는 입사 이온의 에너지 플럭스(쉬스 퍼텐셜과 식각 이온에 대한 Bohm 플럭스의 곱)를 나타내었다.

Fig 6의 (a)를 통해 에지 링에 2MHz 전력을 인가하게 되면 에지 링의 표면이 음전하로 하전되면서 플라즈마 전자 밀도가 감소함을 볼 수 있다. 또한 실험 조건의 식각 플라즈마는 음전하 플라즈마로, Fig 6 (a)의 전자 밀도는 Fig 6 (b)의 이온 밀도에 비해 작게 측정되고 있다. 이온의 밀도는 에지 링 전력이 증가함에 따라 거의 비례하여 증가하며, 이는 2MHz 전력에 의해 에지 링 상단에 플라즈마가 발생하였음을 의미한다. 따라서 플라즈마 전위 또한 증가할 것으로 예상 가능하며, 실제로 Fig 6 (c)에서 플라즈마 전위와 표면 전위의 차로 결정되는 쉬스 전위가 에지 링 전력에 따라 증가함을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 Fig

6 (d)와 같이 이온의 에너지 플럭스 값 또한 증가하게 된다. 이 결과는 가상 계측 모델에서 찾아낸 에지 링 식각에 주요하게 영향을 미치는 인자가 PER 전압과 전력인 이유를 설명한다.

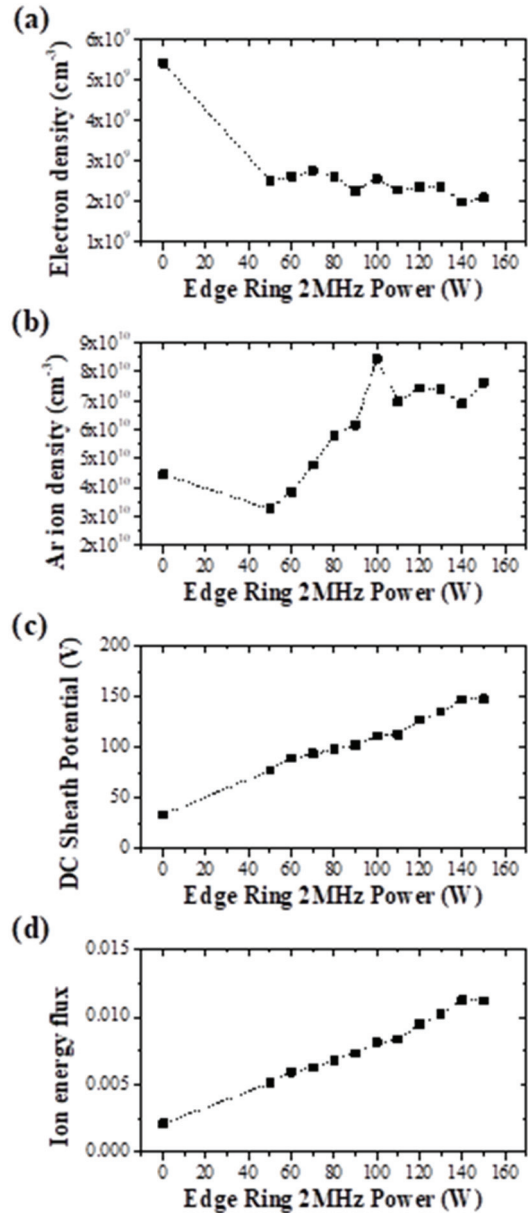


Fig. 6. (a) Plasma electron density, (b) Ar ion density, (c) sheath potential corresponding to the difference between the plasma potential and the floating potential of RFEA, and (d) the energy flux of the incident ion according to edge ring 2MHz power.

4. 결 론

정전척 외곽에 설치된 에지 링의 식각 특성을 관찰했다. 에지 링에 별도의 2MHz 전력을 인가하고, 에지 링 표면에서 SiO₂ 마스크를 가지는 Si 시편의 식각 실험 데이터를 취득했다. 장비 데이터와 센서 데이터를 사용하여 가상 계측 모델, 특히 플라즈마 정보 인자를 입력 데이터 세트에 포함시킨 PI-VM을 개발해서 에지 링 식각에 영향을 주는 핵심 인자를 추적하였다. 주요 인자로는 에지 링에 인가되는 전압과 전력이 선정되었다. 에지 링에 전력을 인가하면 에지 링의 표면 전하가 증가하여 주변에 플라즈마를 생성하고, 플라즈마 전위와 입사하는 이온 에너지 플럭스를 증가시킨다. 따라서 에지 링 전력의 증가는 에지 링의 식각량을 증진시켜 에지 링 식각이 보다 빠르게 진행하게 된다. 본 연구에서 얻은 에지 링 전력에 따른 에지 링 상단의 플라즈마 밀도 변화와 표면 전위 변화는 가장자리 식각 제어에 활용할 수 있는 자료로서 가치를 가진다.

감사의 글

이 논문은 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가기술연구회 2020년도 미래선도형 융합연구단 사업 (No. CRC-20-01-NFRI) 및 BK21플러스 사업 (No. 4199990314119) 및 삼성전자 산학협력과제의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Singh, Vikram, Duane Outka, and Richard Yang. "APPLICATION OF PLASMA AND FLOW MODELING TO THE DESIGN OF OPTIMIZED ALUMINUM ETCH EQUIPMENT." Proceedings of the Second International Symposium on Process Control, Diagnostics, and Modeling in Semiconductor Manufacturing. Vol. 97. No. 9. The Electrochemical Society, 1997.
2. Yang, Kyung Chae, et al. "Effect of structure and material variation of focus ring for enhanced etch resistance." Nanoscience and Nanotechnology Letters 9.1 (2017): 24-29.
3. Yung-Cheng, Jonathan Chang, and Fan-Tien Cheng. "Application development of virtual metrology in semiconductor industry." 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.. IEEE, 2005
4. Park, Seolhye, et al. "Enhancement of the virtual metrology performance for plasma-assisted oxide etching processes by using plasma information (PI) parameters." IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 28.3 (2015): 241-246.
5. Jang, Yunchang, et al. "Characteristics of a plasma information variable in phenomenology-based, statistically-tuned virtual metrology to predict silicon dioxide etching depth." Current Applied Physics 19.10 (2019): 1068-1075.
6. Yoon, Min Young, et al. "Plasma etching of the trench pattern with high aspect ratio mask under ion tilting." Applied Surface Science 595 (2022): 153462.
7. Lieberman, Michael A., and Allan J. Lichtenberg. "Principles of plasma discharges and materials processing." MRS Bulletin 30.12 (1994): 899-901.
8. Meyers, Lawrence S., Glenn C. Gamst, and A. J. Guarino. Performing data analysis using IBM SPSS. John Wiley & Sons, 2013.
9. Jang, Mi-Ran, Yeong-Kyeun Paek, and Sung-Min Lee. "Plasma resistance and etch mechanism of high purity SiC under fluorocarbon plasma." Journal of the Korean Ceramic Society 49.4 (2012): 328-332.
10. Seok, Ogyun, Young-Jo Kim, and Wook Bahng. "Micro-trench free 4H-SiC etching with improved SiC/SiO₂ selectivity using inductively coupled SF₆/O₂/Ar plasma." Physica Scripta 95.4 (2020): 045606.
11. Jaemin Song, "Advanced Process Control Using Plasma Information (PI-APC) for Improving Edge Uniformity of Capacitively Coupled Plasma Etcher", Doctorate, Seoul National University, 2023.

접수일: 2023년 10월 19일, 심사일: 2023년 11월 01일, 게재확정일: 2023년 12월 12일