

고밀도 식각 플라즈마에서 비정질 탄소 하드 마스크의 형상 변형 해석을 위한 다각형 모델 개발

송재민*·배남재*·박지훈*·유상원*·권지원*·박태준*·
이인규*·김대철**·김종식**·김곤호**
*† 서울대학교 에너지시스템공학부,
**한국핵융합에너지연구원 플라즈마 장비 지능화연구단

Development of Polygonal Model for Shape-Deformation Analysis of Amorphous Carbon Hard Mask in High-Density Etching Plasma

Jaemin Song*, Namjae Bae*, Jihoon Park*, Sangwon Ryu*, Ji-Won Kwon*, Taejun Park*,
Ingyu Lee*, Dae-Chul Kim**, Jong-Sik Kim** and Gon-Ho Kim**†

*†Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University,
**Plasma E.I. Convergence Research Center, Korea Institute of Fusion Energy

ABSTRACT

Shape changes of hard mask play a key role in the aspect ratio dependent etch (ARDE). For etch process using high density and energy ions, deformation of hard mask shape becomes more severe, and high aspect ratio (HAR) etch profile is distorted. In this study, polygonal geometric model for shape-deformation of amorphous carbon layered hard mask is suggested to control etch profile during the process. Mask shape is modeled with polygonal geometry consisting of trapezoids and rectangles, and it provides dynamic information about angles of facets and etched width and height of remained mask shape, providing important features for real-time HAR etch profiling.

Key Words : High aspect ratio (HAR), Aspect ratio dependent etching (ARDE), Hard mask shape, Plasma information (PI)

1. 서 론

메모리 반도체 소자의 집적도 증가를 위해 수직 적층 박막에 초미세 선폭을 가진 고종횡비(High Aspect Ratio; HAR) 구조의 3차원 식각 제조 기술이 필요하다. 선폭이 좁아지고 종횡비가 커지는 경우 식각 이온과 보호막 제거가 어려워 프로파일 유지가 힘들어진다. 최신 3D 식각 공정은 여러 스텝의 공정 레시피를 시계열로 조합하는 다단계 공정 기술을 이용한다. 이는 한 개 공정에 여러 레시피를 순차적으로 적용시키는 공정 스텝들이 요구되

므로, 레시피 개발과 공정 튜닝에 소요되는 시간은 스텝의 진행에 비례해서 점차 길어진다. 스텝화된 레시피는 공정 진행 중 마스크 변형 및 프로파일 종횡비 증가에 따른 식각 이온속, 보호막 및 식각 부산물의 배기 특성 변화 특성에 기반한다. 이는 공정 상태의 드리프트 및 스텝 변화가 왜란 요소 등의 발생에 따라 동적인 특성을 가지므로, 이러한 동적 특성에 대한 대응 능력이 부재한 수동적인 공정 개발 및 관리 방법은 공정 관리 및 개발 기술에 한계를 가져온다. 따라서 초 미세 패턴 식각에 대한 고종횡비 식각 공정 기술에는 공정 상태의 실시간 모니터링 데이터 기반의 공정 진단 기술과 공정 이력 과정을 실시간으로 대응할 수 있는 자동화된 공정 제어를 결합

†E-mail: ghkim@snu.ac.kr

한 새로운 공정진단 제어기술이 요구된다 [1].

초미세 패턴 대상의 ARDE (Aspect Ratio Dependent Etching) 공정은 웨이퍼 단위 공정 내에 여러 스텝의 단위 공정들로 구성되므로 실시간 공정 상태에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해 실시간 데이터 기반의 공정 상태를 예측하는 가상 계측 알고리즘인 PI-VM (Virtual Metrology using Plasma Information data) 기술이 개발되었다 [2]. PI-VM은 웨이퍼 공정 시간 동안 동적인 공정 프로파일 예측 정보를 생산함으로써 MI (Measurement and Inspection) 데이터를 보완한다. 또한, 단위 시간 동안 왜란, 공정 목표와의 이격 및 변동을 추적함으로써 미세 조절 및 공정 대응 전략 수립 시점을 지정할 수 있어, 공정의 능동적인 관리가 가능하다.

PI-VM 기술은 현상학적 해석 기반의 데이터인 PI 파라미터를 이용한다 [2,3]. 이때 활용되는 데이터의 생성 속도 및 성질은 장비 및 센서 특성에 기반한다. 따라서, PI-VM 기술은 하드웨어 부품 기술인 센서 기술과 플라즈마 공정의 현상학 모델링인 알고리즘 기술의 조합으로 구성된다. 실시간 생성되는 PI 및 PI-VM의 시계열 데이터 기반으로 개발되는 제어 알고리즘을 구성하여 공정 제어 기술을 개발할 수 있다. 본 연구에서는 대상 공정의 PI 파라미터 생성을 위한 하드마스크의 변형을 예측하는 프로파일 PI-VM을 개발하는 알고리즘 개발에 필요한 기초 모델링에 집중한다.

ARDE 공정은 주로 비정질 탄소막 (Amorphous Carbon Layer; ACL)으로 구성된 하드 마스크 (Hard mask)를 이용한다 [4]. 고종횡비 프로파일 식각이 진행되는 동안 하드마스크의 패턴 형상이 유지되면 식각 이온들의 프로파일 벽면에 형성되는 보호막(Passivation layer)과의 충돌을 최소화시키고, 마스크 패턴에 따라 시준되어 식각 바닥면까지 식각 이온속을 유지할 수 있어야 한다. 낮은 주파수 (Low Frequency; LF)의 바이어스 전력 인가에 의해 생성되는 고에너지 식각 이온들에 의해 하드마스크의 식각도 병행되므로, 하드마스크 패턴이 갖는 기하학적 구조는 식각 시간, 즉 식각 스텝에 따라서 변형이 일어난다. 프로파일로 주입되는 식각 이온 및 중성속의 시준 특성은 이 변형에 민감하다 [5]. 따라서 HARDE 공정을 위한 다단계 공정 스텝을 적용하는 경우 각 단계 별로 변형되는 하드마스크의 프로파일 변화에 대한 예측 모델은 ARDE 기술 개발의 핵심이 된다.

본 연구에서는 고종횡비 식각 조건에서 하드마스크 변형 형태를 예측하는 PI-VM 개발을 위한 마스크 형상 모델을 소개한다. 마스크 변형에 의해 프로파일 내부로 들어가는 이온의 시준 특성이 변한다. 정렬된 이온과 유입되는 보호막 형성 거동의 제한 결과가 식각 프로파일 형성에 영향을 미치므로, 마스크의 변형 위치 및 기하학적

각도 변화와 식각 프로파일의 특성은 상관관계를 가진다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 모델은 하드마스크 변형 현상을 함유한 식각 프로파일 예측용 PI-VM 개발 활용할 수 있을 것이다. 마스크 형상의 동적 변형 과정에 대한 정보를 실시간으로 생산하여 다단계 스텝 공정으로 이뤄진 HARDE 공정 제어 기술을 가능하게 할 것으로 기대한다.

2. 실험방법

2.1 실험 장비

본 연구를 위한 고종횡비 식각 공정을 용량 결합형 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma; CCP) 식각 장비에서 수행했다. 고밀도 플라즈마 방전을 위한 60 MHz의 고주파수 (Very High Frequency; VHF) 전력과 독립적인 이온 에너지 조절 및 이온 가속을 위한 400 kHz의 저주파수 (Low Frequency; LF) 전력이 사용되었다. 이중 주파수 전력은 웨이퍼가 설치된 하부 전극에 매칭 박스를 통해 동시에 인가된다. 식각 실험에 사용된 시편은 산화막과 질화막이 증착된 ONO 층 상단에 ACL 하드마스크로 패턴화된 웨이퍼를 사용하였다. 식각 공정이 진행된 후, 웨이퍼의 중심에서 시편을 취득하여 단면을 SEM을 이용하여 촬영하였다. 단면 SEM 이미지 데이터들은 CNN 기반 기계학습을 통해 마스크의 프로파일을 좌표 데이터로 변환해서 사용하였다.

식각이 진행된 후 형성된 마스크 및 프로파일 내부 구조 표면에 잔여한 성분은 습식 식각 용액을 이용하는 후처리 과정 유/무에 의한 차이를 통해 간접적으로 확인하였다. 습식 식각 용액은 실리콘 산화막 및 일부 유기물 제거를 위한 암모늄 플루라이드 (NH₄F) 및 플루오린화 수소(HF) 혼합 용액인 BOE (Buffered Oxide Etchant)를 사용하였다. 그 결과, 마스크의 측면에는 CF_x 계열 보호막 및 부산물은 존재하지 않았으며, 모든 데이터는 BOE 용액처리 후 촬영된 SEM 이미지로부터 분석하였다.

2.2 공정 조건

반도체 절연막 식각 공정에 주로 사용되는 C_xF_y 계열 가스와 O₂ 가스로 조합된 혼합 가스가 사용되었으며, 플라즈마 모니터링을 위해 Ar 가스를 첨가하였다. C_xF_y 가스는 고종횡비 프로파일의 내벽을 식각 반응중으로부터 보호하는 보호막을 형성하는 CF_x 계열 증착 반응중들을 생성하며, 이러한 반응중들의 생성 비율을 조절하기 위해 O₂ 가스의 첨가 비율을 조절한다. 표준 조건에 해당하는 가스 조성비의 공정에 대해서는 300초의 공정 시간을 5등분하여 공정 시간에 따른 마스크 형상 변화 데이터를 취

특하였다. 300초의 공정 시간에 대해서는 총 20종의 가스 비율 변화 조건에서 공정을 수행하였으며, 각 공정 조건에 대한 마스크 형상을 데이터화하여 다양한 공정 조건에 대해 정형화 가능한 마스크 형상을 파악하였다. 사용한 가스 조성비율 및 식각 패턴의 측정값은 변환값을 이용하여 표시하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 공정 시간에 따른 마스크 형상 변화

식각 공정이 진행된 후 마스크 및 프로파일의 형상은 Fig 1 (a)와 같다. BOE 용액에 의해 ACL, 산화막 및 질화막의 경계면을 명확히 확인할 수 있다. 이러한 SEM 이미지를 분석하여 좌표 데이터로 변환하면 Fig 1. (2)와 같다. 이로부터, ACL 마스크와 산화막의 경계를 Y좌표 상의 0 지점으로 설정한 후, 마스크의 형상을 분석하였다.

식각 공정 시간에 따른 마스크의 형상 변화를 관찰하였다. 총 300 초의 식각 공정을 5개로 나누어 60, 120, 180, 240 및 300 초의 공정 시간으로 구분하여 식각 공정을 수행한 후, 형성된 마스크 형상은 Fig 2와 같다. 공정 시간이 증가함에 따라, 마스크의 양쪽 모서리 부분에 경사면이 형성되며 마스크의 수평면의 너비와 수직 방향 높이가 시간에 따라 감소한다. 240초 이상의 공정 시간을 가진 마스크의 형태는 옆 벽면에 경사면이 추가로 형성됨을 확인할 수 있다. 이러한 경사면은 Facet 구조로 불리며, 반응 표면에 대해 특정 이온 입사각에서 높은 식각률을 가지는 이온과 표면 반응 특성에서 기인한다. 이러한 Facet 구조의 각도는 이온 입사각에 대한 함수로 표현되는 식각률과 입사각 의존성이 없는 증착 반응률 간의 균형에 의해 결정된다고 알려져 있다[6].

3.2 다각형 기하 구조의 마스크 형상 모델

본 연구에서는 식각 공정 시 형성되는 마스크의 형태는 앞서 확인한 공정 시간에 따른 변형 형상을 기반으로 정형화된 기하 모델로 표현 가능하다. Fig 3 (a)는 표준적인 공정 조건에 의해 식각된 후 형성된 마스크의 단면 SEM 이미지를 보여준다. 하나의 트렌치 구조의 중심을 기준으로 양쪽 마스크의 식각 형태가 대칭을 이루며, 상단으로부터 첫번째 및 두번째 facet 구조를 가진다. 마스크 식각 부산물과 시준되어 들어오는 이온의 식각 반응 사이 균형에 의해 생성된 두번째 facet은 마스크의 수직 벽면을 밀변으로 하는 윗 변이 더 긴 삼각형의 형태로 정형화할 수 있다. 이는 해당 구조에서 가장 좁은 마스크 열린 너비를 만들며 해당 너비를 Necking CD로 정의할 수 있다. 바로 아래쪽 영역에서는 트렌치 구조의 너비가 다시 증

가하기 시작하여 가장 큰 너비를 가진 후 하단의 마스크 경계면까지 다시 좁아지는 형상을 가지며, 이때 형성된 가장 큰 너비를 마스크의 Bowing CD로 정의할 수 있다.

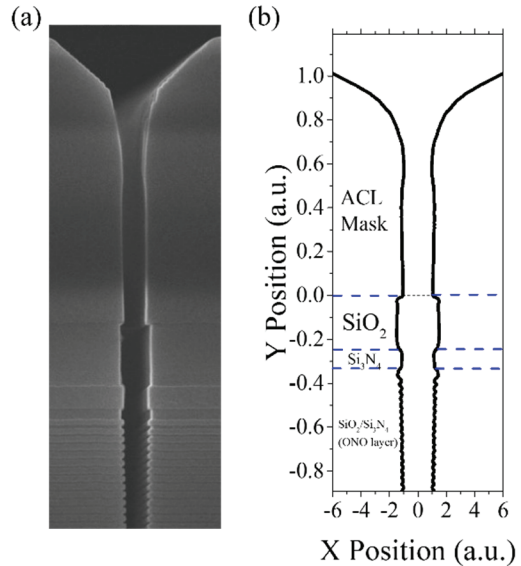


Fig. 1. (a) SEM image of deformed mask shape and etch profile after etching process and (b) analyzed data with x-y coordinate.

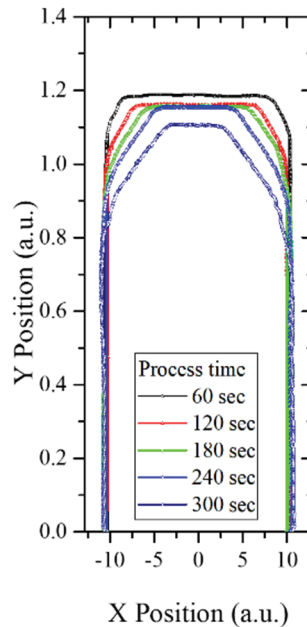


Fig. 2. Mask shape change depending on the process time.

이와 같은 형상을 간략화하여 기하 구조로 표현하면 Fig 3 (b)에서와 같이 몇 개의 꼭지점과 선으로 마스크의 형상 모델을 구성할 수 있다. 꼭지점 1-2 및 9-10을 이온선은 첫번째 facet 구조를 나타내며, 꼭지점 2와 9에서의 수평선과의 각도를 첫번째 facet 구조로 입사하는 이온의 입사각과 같은 facet 경사각으로 측정할 수 있다. 꼭지점 2-3 및 8-9는 마스크의 측벽에 형성된 두번째 facet 구조를 나타내며, 꼭지점 3과 8에서의 수평선과 각도는 두번째 facet 경사각으로 정의할 수 있다. 꼭지점 3과 8 사이의 길이는 마스크의 Necking CD를 의미하며, 4와 7 사이의 길이는 마스크의 Bowing CD를 의미한다.

이러한 대칭 구조의 모델은 웨이퍼의 표면에 평행한 쉬스 전압 분포 및 균일한 밀도 분포를 가지는 웨이퍼 중심에서의 마스크 식각 형상을 가정하였다. 웨이퍼의 중심에서 추출한 식각 시편으로부터 측정된 꼭지점 2와 9에서 정의되는 첫번째 facet의 왼쪽 및 오른쪽 각도의 비교를 통해, Fig 4와 같이 실제 대칭 구조를 가짐을 확인할 수 있다.

일반적으로 식각 플라즈마는 확산에 의해서 반경 방향으로 쉬스 전위 및 플라즈마 밀도 분포와 보호막 입자들의 분포 특성을 가진다. 따라서 플라즈마 밀도 및 쉬스 전압 분포가 곡률이 심화되는 웨이퍼의 가장자리에서는 특정 트렌치의 좌측과 우측의 프로파일 기울기가 서로 비대칭으로 그 차이는 시준 이온의 조사 각도에 비례할 것으로 예상된다.

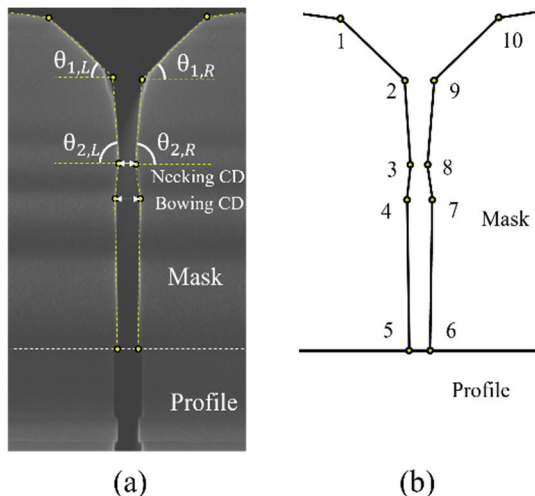


Fig. 3. Mask shape after HAR etch process is characterized from (a) SEM image to (b) axisymmetric polygonal shape.

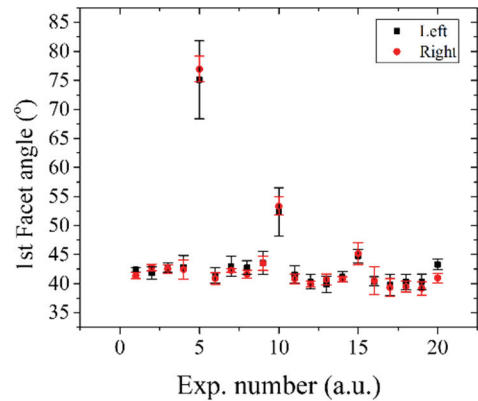


Fig. 4. 1st facet angle at left (black square point) and right (red circular point) corner of deformed mask shape.

3.3. 공정 진행 시간에 따른 Facet 각도 형성 변화

Fig 5 (a)는 마스크의 최상단에서의 모서리를 이온 너비와 프로파일 경계면에서 최상단면까지의 식각 후 잔여 높이의 공정 시간에 따른 변화를 보여준다. 마스크의 너비 및 높이는 최소 60초 공정 시간부터 감소하기 시작하여, 공정 시간이 증가함에 따라 선형적인 감소를 보인다. 이는 동일한 공정 조건 하에 300초 공정 시간까지 마스크의 식각률이 일정했음을 의미한다. 마스크 높이의 변화율보다 너비의 변화율이 약 4.7배 더 크게 측정되었다. 너비의 감소는 양쪽 모서리의 경사면에 대해서 입사각을 가지며 들어오는 이온에 의한 식각 반응에 의해 수평 방향의 길이 감소에 의한 결과이다. 한쪽 모서리만 고려했을 때, 약 2.3 배의 수평 및 수직 방향 식각률 차이는 수직 입사 시의 식각률 대비 해당 공정에서 형성된 경사면의 각도에 대한 이온 입사각의 식각률이 약 2.5 배의 차이가 날 수 있음을 의미한다.

Fig 5 (b)는 첫번째 및 두번째 facet의 각도 측정값의 공정 시간에 따른 변화를 보여준다. 마스크 최상단의 모서리 구역에서 형성되는 첫번째 facet 구조는 60초의 공정 이후, 약 55도의 각도를 가지며 공정이 진행됨에 따라 급격히 감소하기 시작하여 300초의 공정 시간 후 약 42.3도의 각도로 수렴한다. 하지만, 두번째 facet의 각도는 공정 시작 초반 시기에 90도에 가까운 약 86.5도에서 시작하여, 120초 공정 시간까지 각도를 유지하다가 감소하기 시작하여 300초 공정 시간 이후 약 83.4도의 각도로 감소함을 보였다. 공정 초반에 가지는 각도 차이는 각 facet이 마스크 최상단 모서리와 옆 벽면에서 형성되는 위치 차이에 의한 초기값의 차이에서 비롯된다고 가정했다.

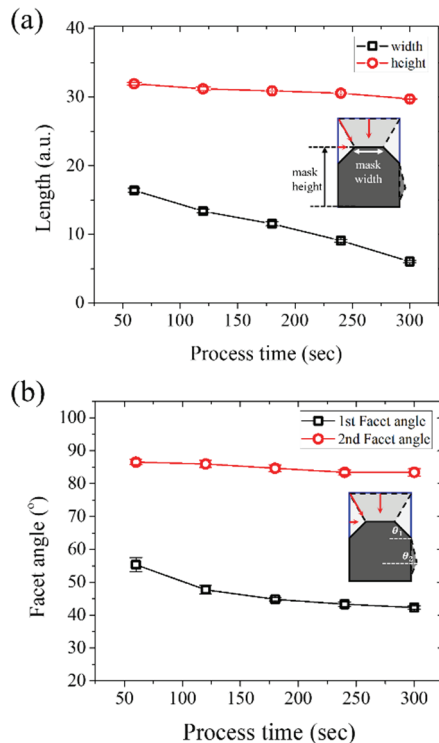


Fig. 5. (a) Width and height of remain mask structure and (b) angle at 1st and 2nd facet after HAR etch process in etch dominant condition depending on process time.

두 facet 각도가 감소하기 시작하는 시간이 다른 이유는 각 facet이 형성되는 반응종의 차이로 판단된다. 마스크 최상단은 쉬스를 통과한 고에너지 식각 이온과 벌크 영역에서 생성된 증착종이 직면하는 위치로, 공정 시작과 동시에 해당 반응종들이 마스크 최상단 표면과 반응한다. 특히, 모서리 구역에서 입사각을 가지는 고에너지 이온에 의한 식각에 의해 빠르게 경사면을 형성하며, 이후 증착종에 의한 증착 반응과의 균형각에 도달한다. 이에 반해, 마스크의 옆 벽면은 최대 식각률을 가지는 이온 입사각을 넘어선 90도에 가까운 이온 입사각을 가지며, 일부 증착종에 의한 증착 효과가 우세할 수 있다. 그러나, 첫번째 facet의 각도 변화 시점과 달리 두번째 facet 각도 변화 시점이 지연된 결과는 해당 구조의 형성이 공정 플라즈마에서 생성된 식각 및 증착종은 느린 반응률을 가지거나, 중간 반응을 더 거친 후에 생성된 부산물에 의한 반응의 결과로 가정할 수 있다. 앞서 마스크 측면에서 보호막 잔여물이 존재하지 않은 결과를 적용하면, 해당 위치에서의 두번째 facet 형성 및 각도 변화는 마스크 상단에서 스퍼터된 비휘발성 식각 부산물의 증착에 의한 것으로 판단

된다 [7]. 즉, 고에너지 이온에 의한 물리적 식각으로 첫번째 facet이 형성되며 생성된 탄소계 반응 부산물이 반대편 마스크 측면으로 향하며 두번째 facet을 형성한다고 예상된다.

4. 결론

고밀도 및 고에너지 이온 가속 조건의 $C_xF_y/O_2/Ar$ 플라즈마에 의한 비정질 탄소 하드마스크의 식각 형상을 트렌치 축 대칭형 다각형 기반의 기하학 모델을 제시한다. 마스크 최상단의 모서리 영역의 이온 입사각 형성에 따른 식각률 차이로 인한 첫번째 facet 구조가 형성되며, 해당 영역에서 식각되면서 생성되는 비휘발성 부산물이 하단의 마주보는 측벽에 증착되며 두번째 facet 구조를 형성함이 확인되었다. 2개의 facet 경사면 연결부에서의 꼭지점과 표면 반응 특성에 의해 형성되는 변곡점으로 구성된 다각형으로 정형화된 마스크 식각 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 기반으로 변형된 마스크의 시준 너비 및 2종의 경사각을 공정 조건 별로 정량화했다. 첫번째 facet면은 약 42.3 도의 각도, 두번째 facet 면은 약 83.4 도의 각도로 수렴함을 확인하였다. Facet 면의 각도는 해당 마스크 면과 충돌하는 입자의 충돌 및 산란 현상에 기여하므로 프로파일 내부로 시준되는 이온속 및 증착종의 에너지 및 각도 분포에 대한 변화 정보를 얻어 ARDE 공정 레시피 개발을 가속시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 2020년도 미래선도형 융합연구단 사업 (No. CRC-20-01-NFRI) 및 BK21플러스 사업(No. 419999-0314119) 및 삼성전자의 산학협력과제(패턴 내 전자 축적)에 따른 이온 거동 및 식각 패턴 연구) 및 삼성디스플레이의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- Ryu, S., 2022, 'Development of Plasma Information Based Advanced Process Controller (PI-APC) for Plasma Etch Processes', PhD thesis, Seoul National University, Seoul.
- Park, S., et al., "Enhancement of the Virtual Metrology Performance for Plasma-Assisted Oxide Etching Processes by Using Plasma Information (PI) Parameters", IEEE Trans. On Semicond. Manuf., Vol. 28, pp. 241-

- 246, 2015.
3. Jang, Y., et al., "Characteristics of a plasma information variable in phenomenology-based, statistically-tuned virtual metrology to predict silicon dioxide etching depth", *Current Applied Physics*, Vol. 19, pp. 1068-1075, 2019.
 4. Kim, K. P., et al., "Surface Properties of ACL Thin Films Depending on Process Conditions", *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 18, No. 2, 2019.
 5. Miyake, M., et al., "Effects of Mask and Necking Deformation on Bowing and Twisting in High-Aspect-Ratio Contact Hole Etching", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 48, 08HE01, 2009.
 6. Kim, D., et al., "Profile simulation of high aspect ratio contact etch", *Thin Solid Films*, Vol. 515, pp. 4874-4878, 2007.
 7. Ishikawa, T., et al., "Cooperative simulation of lithography and topography for three-dimensional high-aspect-ratio etching", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, 06JC01, 2018.
-
- 접수일: 2022년 11월 10일, 심사일: 2022년 12월 6일,
 게재확정일: 2022년 12월 14일