

반도체/디스플레이 공정 플라즈마 기초와 응용

장 흥 영 (한국과학기술원 물리학과)

I. 머리말

플라즈마 과학은 1808년 H. Davy의 직류 아크방전 개발과 1830년대 M. Faraday 등의 고전압 아크방전 튜브 개발에서 시작되었다고 볼 수 있으며, 19세기 동안 아크 방전이나 직류 방전 플라즈마는 가스 램프를 대체하기 위해 활발히 연구되어 왔었다. 1879년 W. Crookes는 플라즈마는 물질의 제 4상태라고 규명했다. 이때의 플라즈마는 저온에 있는 고체물질에 열을 가하면 녹아 액체로 변하고, 증발하여 가스로 변화되며, 열을 더 증가하면 각 원자들은 전자들과 양이온들로 깨져 물질의 제 4상태가 된다고 보았다. 그러나 진정한 의미의 플라즈마란 자유 하전입자인 전자, 이온 및 중성입자로 구성되어 있으며, 전기적으로는 중성인 성질을 가지고 있는 상태라는 개념이 1928년 Langmuir에 의해 처음 도입되었다.^[1] 이와 같이 가스 플라즈마는 백년 넘게 하나의 연구주제가 되어 왔으며, 플라즈마 물리의 기초는 19세기 말 원자물리의 발전에 크게 힘을 입었다고 Raizer^[2]는 지적하고 있다. 20세기 후반기 동안 플라즈마에 관한 모든 연구는 핵융합과 우주 플라즈마 분야에 초점이 맞추어져 왔으며, 1960년까지 공정 플라즈마에 대한 대부분의 관심은 가스 방전 레이저와 램프 개발에 있었다. 1960년대 말부터 PECVD에 의한 SiN 박막형성과 산소 플라즈마를 이용한 Photoresist(PR) 에싱 가능성 그리고, CF₄/O₂ 혼합가스를 이용 SiN 박막 식각에 플라즈마 응용 가능성이^[3] 처음 제안되는 등 반도체 분야에서 공정플라즈마의 응용이 시작되었다. 이러한

플라즈마 기술은 1970년대 후반부터 1980년대 초반까지는 반도체 칩 제조에 있어서의 중요성이 아직 크게 대두되지 않았다.^[4]

1980년도 중반부터 반도체의 집적도가 급속히 높아짐에 따라 높은 형상 비(aspect ratio)에서 선풍 미세화에 대한 기술이 절실히 요구되었다. 종래의 습식 식각기술은 등방성 식각 특성 때문에 이러한 공정 조건을 만족시킬 수 없어, 비등방성 식각이 가능한 플라즈마 공정 기술 도입이 절실히 요구되었다. 이러한 공정 개발에 힘입어 1980년도 중반부터 1998년도 초까지 디바이스의 최소 선풍폭은 2 μ m에서 0.2 μ m 이하로 감소했고 칩 당 트랜지스터 수는 16K에서 1G 이상이 됐다.

플라즈마 식각이나 플라즈마 증착들이 요구되어지는 또 다른 이유는 플라즈마는 가스 상태이고 효율성이 뛰어나므로 습식 식각에 비하여 공정 중 발생하는 폐기물량이 매우 적어 환경오염을 상당히 억제시킬 수 있는 장점과 웨이퍼를 진공 속에 두고 반송 자동화를 시킬 수 있어 외부로부터의 오염을 억제할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문이다. 현재 공정용 플라즈마는 여러 가지 박막 증착 기술(Sputtering, PECVD, Anodization과 Planarization)과 플라즈마 식각에 활발히 응용되고 있다.

현재 반도체 제조 공정 중 플라즈마공정이 차지하는 비중은 30% 이상이고, 플라즈마 식각은 폴리 실리콘, 산화막과 금속 등의 중요한 식각공정과 평면 디스플레이(FPD) 제조공정에 크게 사용되고 있다.^[5]

이 글에서는 먼저 반도체/디스플레이 분야에서 플라즈

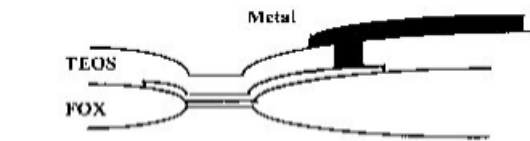
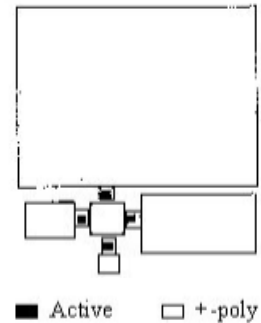
마의 여러 가지 응용과 전망에 대해 살펴보고, 다음 장에서는 여러 가지 공정 플라즈마 발생 장치의 플라즈마 발생원리 및 특징을 살펴보고, 마지막으로 이러한 공정플라즈마의 플라즈마 물성을 진단하기 위한 플라즈마진단 장치들에 대하여 논의해 보기로 한다.

II. 플라즈마 공정

반도체/디스플레이 제조공정에서 플라즈마의 응용성은 매우 다양하지만 여기에서는 공정 플라즈마에 대해서만 언급하고자 한다. 반도체/디스플레이 제조공정에 응용되는 플라즈마는 크게 세 가지 부류로 나눌 수 있다. 이 세 가지 부류에는 플라즈마 에싱(ashing), 플라즈마 CVD, 플라즈마 식각이 있다.

1. 플라즈마 에싱

플라즈마를 이용한 에싱 공정은 Irving^[5]이 1968년 Kodak PR 세미나에서 가능성을 제시한 이후 널리 이용되기 시작하였다. 이것은 반도체 제조공정에서 종래 사용되어 왔던 화공약품(H_2SO_4/H_2O_2 또는 알칼리용액)을 사용하는 습식 제거 방법의 단점(막대한 화공약품의 사용으로 인한 경제적 부담, 폐수처리 등의 환경문제, 비효율성과 이온주입을 받은 PR은 습식 방법으로 제거곤란)을 해결하기 위하여 제안되었으며, 화학적 식각과 같은 원리를 이용한다. 초기의 에싱 장비는 배치식(약 100매/배치) 처리를 위하여 원통형의 챔버 구조를 가지고 있었다. PR은 C, H, O의 원자들로 구성되어있는 폴리머이므로 에싱 공정에서는 주로 O_2 가스를 사용하여 CO, CO_2 등의 휘발성 반응생성물 생성을 통해 PR을 제거한다. 이러한 에싱 공정은 여러 가지 단점들을 가지고 있다. 이중 가장 커다란 문제는 전하축적 손상이다. 에싱 중 일부의 축적전하 전류가 얇아진 PR을 뚫고, 하지 도체 막에 전달되어 쌓이면 그 밑에 있는 게이트 산화막을 파괴할 수 있다. 또한, PR없이 웨이퍼가 플라즈마에 노출되면 에싱으로부터 더 심각한 손상을 받을 수 있다.^[6] 또 하나의 문제점은 PR속에 미량으로 함유된 중금속 등이 플라즈마 에싱으로는 제거할 수 없어 에싱 후 남게 되므로 후속공정에서 하부 막



[그림 1] 전기적 손상을 평가하기 위한 금속 안테나 구조의 평면도와 단면도

으로 확산되어 디바이스의 특성을 저하시키기도 한다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 PR 제거공정은 100% 플라즈마 에싱 공정만으로 구성되지 않고, 플라즈마 에싱과 습식방법을 9:1 정도의 비율로 적용, 잔유물을 완전히 제거한다.

최근 들어 디바이스 고집적화(submicron device)로 게이트 산화막의 두께가 6nm 이하로 줄어들어, 플라즈마 손상은 디바이스의 신뢰성을 저하시키는 중요문제로 다시 부각되고 있다. 플라즈마 에싱이 공정의 가장 후반 공정이므로 웨이퍼가 플라즈마에 직접 노출되어 가장 심각한 손상을 야기한다. 보통 플라즈마에 의한 손상은 PR없이 플라즈마 노출시간을 증가시키는 방법으로 평가되어 왔으나,^[7] 최근에는 금속전극 상단에 있는 PR에 전하 축적이 일어나 얇은 게이트 산화막을 손상시킨다는 보고가 있어,^[8] 이에 대한 측정 방법으로 금속-안테나 구조를 이용, 전하축적에 의한 산화 막의 특성을 평가하는 것이 일반화되고 있다([그림 1] 참조).

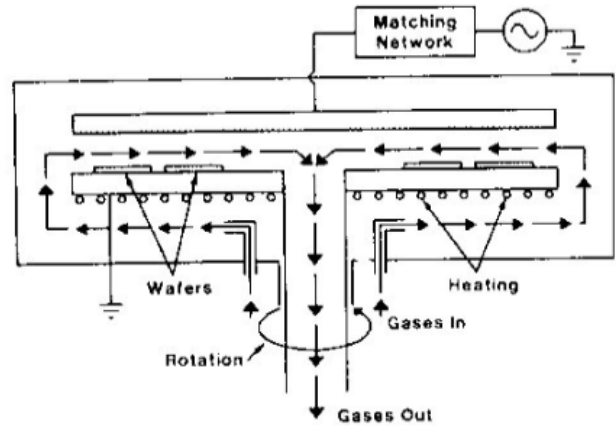
2. 플라즈마 CVD

얇은 박막은 현 VLSI회로 제조 공정에서 디바이스 내에서 도체, 금속배선 사이의 전기적 절연체 또는 주변부의 단절을 위하여 널리 사용되고 있다. 이런 얇은 박막에

요구되는 조건들은 다음과 같다. 막 두께는 디바이스 전체뿐만 아니라 웨이퍼간에도 균일해야 하며, 박막의 구조와 조성은 재현성이 있어야 한다. 끝으로 박막 증착 방법은 안정성, 재현성, 쉬운 자동화와 가격 경쟁력이 있어야 한다. 가장 널리 사용되고 있는 물질은 폴리 실리콘, 산화막, 질화막 등이 있다. 이러한 박막을 생성하는 방법들에는 크게 APCVD(Atmospheric Pressure CVD), LPCVD (Low- Pressure CVD), 그리고 PECVD (Plasma-Enhanced CVD) 등이 있다.^[9~11] 이런 생성원에 의해 생성된 박막들에 대한 특성을 [표 1]에서 비교하였다.

PECVD 공정은 플라즈마 식각이 사용되기 이전부터 반도체 금속 배선의 보호막인 SiN과 SiO₂를 저온에서 증착할 수 있는 새로운 방법으로 소개되었다.^[12] 1975년 TI, AMT사의 상용화된 PECVD 장치가 발표된 후, 1980년에 들어서는 필수적인 반도체 공정 설비로 자리를 굳혔다.^[13] 이렇게 도입된 PECVD 기술은 SiN과 SiO₂박막형성뿐만 아니라 최근에는 전이 금속이나 전이 금속 실리사이드 형성에서도 널리 사용되고 있다.

PECVD에 의한 박막 형성 메커니즘은 1)플라즈마에서 이온과 라디칼 형성 2)라디칼 흡착 3)표면에 붙은 원자의 재 분포로 화학적, 물리적 반응들이 일어난다.^[14] 전형적인 PECVD 조건에서는 전자의 에너지가 충분히 작아 이온화 속도보다 라디칼의 형성속도가 빠르다. 또한 라디칼



[그림 2] 일반적인 PECVD 장치

은 높은 흡착계수를 가지고 있어 쉽게 표면에 흡착한 후, 가장 안정된 곳으로 이동, 새로운 결합을 만들고 박막을 형성하게 된다. 때로는 외부 공정 변수에 따라 가스 상태에서 핵 형성 반응이 일어나기도 하고, 플라즈마내의 불순물은 핵 씨앗으로 작용, 불필요한 먼지 입자를 생성시킬 수도 있다. 일반적으로 PECVD 공정 변수들은 기판 온도, 가스 조성비, 가스 유량, 압력, 입력 파워 및 주파수와 전극 간격 등이다. 전형적인 PECVD 장치는 [그림 2]와 같이 평형 평판형 구조를 가지고 있으며, 웨이퍼는 접지 전극에 두어 이온 충돌에 의한 스퍼터링 효과를 최소화하고 있다. PECVD에 의한 박막특성은 증착속도, 박막 조성비, 밀도, 굴절률, 막 두께의 균일도, 응력, 표면 덮음율(stepcoverage)과 식각 속도 등으로 평가한다. PECVD 방식으로 형성할 수 있는 여러 가지 박막들을 플라즈마 공정관점에서 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

(1) PECVD SiN, SiO₂박막

PECVD를 이용한 SiN, SiO₂박막 형성은 좋은 접합성, 낮은 핀홀(pinhole) 밀도, 좋은 표면 덮음율, 좋은 전기적 특성, 저온 증착 가능성과 높은 증착 속도를 가지고 있어 비교적 낮은 용융점을 가지고 있는 금속의 보호막 및 다중금속배선간의 공간 절연막으로 사용된다. PECVD에 의한 SiN 박막은 N₂/SiH₄또는 NH₃/SiH₄혼합가스를 이용한다. 공정변수인 입력 파워를 증가시키면 전자와 라디칼의 밀도가 증가하여 증착 속도는 빨라지고, 압력을 줄이면 라디칼의 확산속도와 전자에너지를 활성종에 전달하는

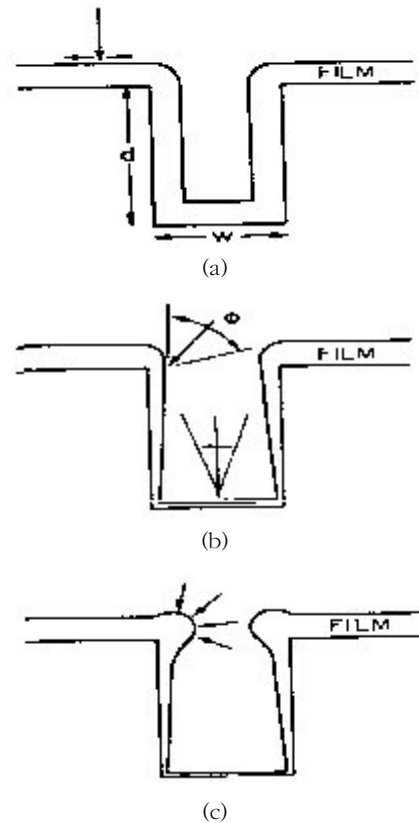
[표 1] 성막 방법에 대한 비교

Deposition Properties	Methods		
	APCVD	LPCVD	PECVD
Temperature	300 - 500	500 - 900	100 - 350
Materials	SiO ₂ P-glass	Poly-si SiO ₂ P-glass Si ₃ N ₄	SiO SiN
Uses	Passivation, Insulation	Passivation, Insulation, Gate metal	Passivation, Insulation
Throughput	High	High	Low
Step coverage	Poor	Conformal	Poor
Particles	Many	Few	Many
Film Properties	Good	Excellent	Poor
Low temperature	Yes	No	Yes

효율 증가로 웨이퍼간 균일도 향상과 표면에서의 반응이 좋아진다.^[10] 또한, 아르곤과 같은 비활성 가스를 첨가해 주면 페닝 효과에 의해 전자 에너지는 쉽게 라디칼에 흡수되어 균일도가 더 향상된다.^[15] SiN 박막의 화학적 결합은 IR-분광기를 이용하여 분석할 수 있는데, 통상 Si-N, N-H, Si-H, Si-O 등이 검출된다. 여기서 Si-O 결합은 반응 챔버 내의 수분이나 챔버 벽면에서 이탈된 산소에 의해 생성되므로 증착 전 챔버를 고온으로 가열시키는 게 필수적이다.^[16] Si-H/N-H 결합 비율은 NH_3/SiH_4 가스 조성비에 의해 결정되고, 이것은 박막의 굴절률을 결정하는 중요 변수가 된다.^[17] 화학양론(stoichiometric) 관점에서 SiN 박막 조성비는 입력 파워, 기판 온도, 가스 혼합비에 의해 결정된다. 이 박막 조성비는 박막의 응력을 결정하는데, SiN 박막은 압축 응력(compressive stress)을 가지고 있어 후속 열처리 공정에서 균열과 같은 문제를 유발할 수도 있다.

SiO_2 박막은 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 혼합 가스를 이용하여 생성할 수 있다. 여기서 O_2 대신 N_2O 가스를 사용하는 이유는 N-N 결합 에너지는 N-O 결합 에너지보다 크기 때문에 플라즈마 내에서 반응성 질소의 분해 속도를 낮추어 가스 상태의 핵형성에 의한 먼지 입자의 생성을 낮추기 위해서이다. $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 혼합 비율은 박막의 굴절률 특성을 상당히 변화시키는데, N과 Si 함유량이 클수록 굴절률은 증가하게 된다. 대체로 PECVD SiO_2 박막은 압축 응력을 가지고 있으나, 입력 파워의 주파수를 바꾸면 인장력(tensile stress)으로도 바뀔 수 있다.^[18]

균일한 표면 덮음율(Conformal stepcoverage)은 [그림 3]-(a)에서 보듯이 측면이나 바닥의 박막 두께가 일정한 것을 의미한다. 이것은 표면에 흡착된 라디칼이 반응하기 전 표면을 따라 빨리 이동하여 균일한 표면 농도를 유지하기 때문이다. 만일 라디칼의 표면 이동이 없으면 증착 속도는 입자들의 입사 각도에 의존하게 되는데 가스의 평균 자유행로가 단차의 길이보다 길면 [그림 3]-(b)에서 보듯이 상단의 입사각도는 180도이나 바닥 면의 입사각도는 90도가 되어 바닥 면의 증착 속도가 떨어진다. 또한 평균 자유행로가 더 짧을 경우 [그림 3]-(c)에서 보듯이 상단의 입사각도는 270도가 되나 바닥 면은 90도가 되어 더욱



[그림 3] 증착된 박막의 stepcoverage 특성
(a) conformal (b),(c) nonconformal stepcoverage

악화된다. 이러한 관점에서 PECVD는 APCVD보다 평균 자유행로가 길어 더 좋은 표면 덮음율을 갖게 된다. PECVD SiN 박막은 알칼리 금속이나 수분에 대한 침투 억제 능력을 가지고 있고 SiO_2 박막은 전자이동을 막아주는 특성을 가지고 있어, 이 두 가지 박막을 동시에 금속배선 보호막으로 사용한다.

(2) PECVD W, WSi_2 박막

텅스텐(W) 박막 증착은 WF_6/H_2 혼합 가스를 이용해 생성한다. 증착 속도는 박막의 활성화 에너지와 관련이 있는데, PECVD의 활성화 에너지는 0.16eV로 APCVD(0.69eV), LPCVD(0.71eV)와 비교할 때 매우 낮고, 또한 APCVD의 경우 증착 속도는 기판의 표면에서 H_2 분해율에 의해서 결정되는데 비해 PECVD는 수소원자가 플라즈마 내에 이미 존재하므로 200-400도 정도의 낮은 온도에서 높은 증착 속도를 보인다.^[19]

이와 같이 증착된 W 박막은 구조적으로 주상(columnar) 구조를 가지고 있으며, 200nm 두께에서 20-40nm 크기의 결정립(grain)은 후속 열처리(900°C)공정에 의해 50-70nm 정도까지 성장되어 저항이 낮아진다.^[20] 또한, W 박막의 저항은 가스조성비, 기판온도 등에 의해 조절되기도 한다. WSi_2 나 $MoSi_2$ 는 디바이스가 고 집적화(1DRAM 이상) 되어 종래 게이트 전극으로 사용되어 왔던 폴리 실리콘의 면저항(sheet resistance)이 높아 디바이스의 속도를 저하시키는 문제가 크게 대두되어 본격적으로 도입되었다. WSi_2 는 WF_6/SiH_4 혼합가스에 의해 생성될 수 있는데, 플라즈마에서 Si를 공급하여 표면에서의 핵 형성을 용이하게 할 수 있으므로 W 박막의 증착 속도보다 WSi_2 증착 속도가 더 빠르다. 이 박막의 W와 Si의 조성비와 비저항은 일반적으로 WF_6/SiH_4 가스의 혼합비율에 의해 제어되며, 박막에 함유된 F와 H의 결합이 저항을 높이는 요인이 되므로 열처리를 하여 이들을 박막에서 방출시켜 저항을 낮추어야 한다.^[21]

3. 플라즈마 식각 공정

반도체/디스플레이 제조에서 플라즈마를 이용한 식각은 단순한 기술의 수준을 떠나 하나의 예술로까지 승화되었다. 일반적으로 플라즈마 식각 공정 변수로는 입력 파워와 주파수, 반응가스의 선택과 혼합비, 가스 압력, 전극의 구성과 배치, 전기장 외에 자기장을 사용하는 방식 및 기판 바이어스전압 등이 있다. 식각이 일어나기 위한 반응으로 다음과 같은 네 가지 식각 메커니즘이 있다.^[22]

(1) 스퍼터링에 의한 식각

스퍼터링에 의한 식각은 플라즈마 쉬스에 의해 가속된 고 에너지 이온들의 박막과의 충돌을 통해 일어난다. 이온의 에너지가 표면 원자 결합에너지보다 클 때 표면 원자는 표면에서 이탈되며 식각이 진행된다. 이 반응은 순수한 물리적 반응이므로 후방산란(back scattering)이 일어나지 않도록 가스 압력이 낮아야 하는데 이런 이유에서 선택성이 좋지 않고, 표면에 손상을 주며, 식각에 의해 방출된 입자는 휘발성이 낮아 재 부착 때문에 식각 속도가 매우 낮다.

(2) 화학적 식각

플라즈마 내에서 발생된 라디칼은 박막 표면에 도달해 막과 화학 반응을 일으켜 휘발성 있는 반응 생성물을 생성시킨다. 식각이 계속 진행되기 위해서는 반응 생성물의 휘발성이 매우 높아야 한다. 만일 휘발성이 낮으면 반응 생성물이 표면에 남아 라디칼과 기판 물질과의 화학적 반응을 막아 식각이 중단된다. 이 방식에서 플라즈마의 역할은 라디칼을 공급하는 것이고, 이 반응은 화학반응이므로 식각 방향성이 없어 등방성 식각만이 일어나며 선택비가 매우 높다.

(3) 이온의 도움에 의한 식각

(1), (2) 이후, 이온 도움(ion assist)에 의한 플라즈마 식각이 고안되었다. 이것은 이온 충돌을 동반한 상태에서 막과 화학적 반응을 일으키는 중성 라디칼을 이용하여 식각하는 방법이다. 이 경우 중성 라디칼과 이온 충돌은 식각 상승 효과에 의해 식각 속도는 각각의 식각 속도의 합보다 매우 크게 된다. 이것은 박막에 이온 충돌을 주면, 결정 구조의 파괴 또는 변형을 일으켜, 라디칼에 의한 반응 에너지 감소로 식각 속도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 이 식각에서는 반응 가스의 종류, 박막의 표면 상태, 도달하는 라디칼의 유량 등에 의해 이온의 역할이 변하며, 이온은 쉬스 전압에 의해 한 방향으로 가속되므로 방향성 식각 특성을 가진다.

(4) 이온 충돌과 측면 보호막에 의한 식각

이 방식은 먼저 증착성이 좋은 가스에 의해 측면과 바닥면에 보호막을 형성한 후, 방향성 이온 충격으로 바닥면의 보호막이 제거되면, 라디칼들의 화학적 반응으로 바닥면을 식각한다. 이러한 반응이 연속적으로 일어나 식각이 진행되며, 이 방식은 뛰어난 이방성 식각 특성을 가진다.

실제 반도체/디스플레이 제조를 위한 플라즈마 식각 공정에서 장치의 구조, 반응의 선택 등은 많은 경우 경험에 의존하고 있고, 공정 압력, 입력 파워, 반응성 가스의 혼합비, 유량 결정 등은 식각 속도 및 균일도와 관련해 실험적으로 결정되고 있어 최적의 공정 조건을 예상하기란 매우 힘들다. 역사적으로 초기의 플라즈마는 직류 방전을

이용하여 플라즈마 물성을 연구하였으나, 실제 공정 플라즈마에서 직류 방전을 이용한 예는 극히 드물다. 직류의 경우는 교류와 달리 두 개의 전극 모두 도체이어야 하므로 전극에 절연막이 형성되면 방전은 중지된다. 또한, 직류 방전에서는 전류 밀도가 낮아 압력을 높여야하는데, 이것은 이방성 식각 관점에서는 매우 불리한 조건이 된다. 평판형 전극사이에 저주파(10kHz-1MHz) 전압을 인가하여 플라즈마를 발생시키면, 이온과 전자 모두 교류전압의 진동에 반응한다. 그 결과 방전은 직류의 경우와 유사해지고, 반주기 단위로 각 전극은 양극(anode)과 음극(cathode)이 된다. 발생된 플라즈마는 확산 재결합 등에 의해 소멸되어가는데, 이 소멸 시간 상수는 대략 1us-10ms 정도로 저주파의 주기와 비슷하며, 이 주파수 대역에서는 한 주기 전에 발생된 플라즈마(전자와 이온)가 일부 남아 다음 주기의 방전에 영향을 미치는 것이 직류방전과 비교해 큰 차이점이다. 따라서 교류 방전이 직류 방전에 비해 낮은 압력에서 방전이 가능하다. 입력 파워의 주파수는 발전기 파워, 플라즈마 임피던스와 식각 특성을 고려해 선택된다.

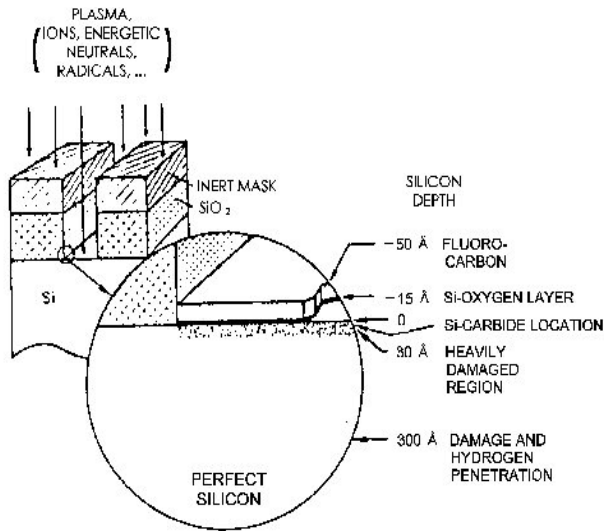
플라즈마 식각은 응용하는 관점에 따라 몇 가지 중요한 공정 특성을 가지고 있다. 고집적 디바이스에 있어서 비등방성 식각은 마스크에 대한 하부 막의 패턴 충실도(fidelity)를 향상시키기 위해 필요하고 수평 방향의 식각 속도보다 수직 방향의 식각 속도 비를 크게하는 것을 의미하는데, 이것은 물리적인 특성과 화학적인 특성을 이용하여 실현할 수 있다. 물리적 특성은 플라즈마 경계(boundary)에서 이온이 입사하는 방향에 따라 달라진다. 쉬스에서 가속된 이온은 주로 측면보다 바닥에 충돌하게 되지만, 전기적으로 중성인 라디칼은 방향성이 없이 즉, 등방적으로 기판에 입사하게 된다. 순수한 물리적인 식각의 주요 문제는 일반적으로 식각 속도는 중성 라디칼의 도움이 없으므로 낮고, 스퍼터링 속도는 대부분의 물질에서 거의 동일하므로 낮은 선택성을 가지는 것이다. 식각에서 선택성이란 다른 두 물질간의 상대적인 식각 속도 차이를 의미한다.

선택비의 중요성은 MOSFET의 폴리 실리콘 전극 식각 공정의 예에서 쉽게 찾을 수 있다.^[23] 하부 단차에 의해

비등방성 폴리 실리콘 식각 시 잔유물(stringer)을 남긴다. 이러한 잔유물을 완전히 제거하기 위해서는 100% 정도의 과식각(over-etching)이 필요하다. 이 과식각 시간 동안 하부 막인 얇은 게이트 산화막(6nm)은 플라즈마에 노출되어, 고 선택비를 가지고 있지 못하면 얇은 게이트 산화막이 식각되어 디바이스의 성능과 신뢰성을 손상시킨다.

균일도는 웨이퍼 모든 부분에서 식각 속도가 같아야 함을 의미한다. 비 균일도는 고 선택비 공정에서는 문제가 되지 않으나, 플라즈마 손상 관점에서는 문제시된다. 균일도에 관련된 다른 문제로는 근접효과(proximity effect)와 형상 비(aspect ratio)에 의존하는 식각에 있다. 전자의 경우 밀집한 패턴지역에서의 식각 속도는 고립된 패턴지역에서의 식각 속도와 차이가 있음을 의미하고, 후자의 경우 식각 중 가로 세로 비가 변함에 따라 식각 속도가 변화함을 의미하는데, 두 효과는 패턴 근처에서의 국부적인 화학 반응 과정과 라디칼의 수송에 대한 분석을 요구한다.^[24] 높은 가로 세로 비를 가지는 패턴에서 발생하는 또 다른 문제는 CD(critical dimension)제어이다. 예로, 가로세로비 4인 구멍에서 식각 후 86도 경사를 가진다면 구멍 바닥의 면적은 적어져 접촉 저항 증가를 유발하게 된다. 그러므로 산화막 식각에서 접촉 구멍 면적 손실(contact hole area loss)은 소자의 성능에 커다란 문제를 유발한다.

플라즈마 식각에서 손상과 오염은 낮은 수율과 디바이스 신뢰성을 감소시키므로 해결해야할 심각한 문제이다. 일반적으로 손상은 웨이퍼 표면에서 고 에너지를 가지는 이온 충격에 의한 격자 손상과 전기적 손상으로 구분된다. 후자의 경우 유전체의 전하축적에 의한 게이트 산화막 파괴이다. [그림 4]에서는 고에너지를 가지는 이온, 중성종, 라디칼 등에 의한 실리콘 표면 손상을 설명하고 있다.^[25] 현재의 관심 중 하나는 고밀도 플라즈마에서는 이러한 손상을 매우 감소시킬 수 있다는 것이다. 기본적인 아이디어는 식각 속도가 이온 선속에 비례할 경우, 에너지를 낮추고 선속을 증가시키면, 이러한 조건을 만족시킬 수 있다. 많은 전문가들은 향후 공정에서는 플라즈마 손상과 오염해결은 핵심문제로 대두될 것으로 보



[그림 4] CF₄/H₂ 혼합 가스를 이용한 RIE 산화막 식각 시 하지 실리콘 기판의 표면 성질 변화

고 있다.

위에서 언급한 여러 가지 식각의 요구사항들을 충족시키기 위해 저 압력 고밀도 플라즈마 생성원(HDP)들이 1990년도 초반부터 등장하기 시작했다. 그러나 이러한 HDP들은 종래 사용하여 왔던 CCP에 비해 전자온도가 두 배 가량 높고, 기체 분자들의 분해율이 높기 때문에 원하지 않는 라디칼들을 과잉 생성하게 되어 선택비 등을 만족시킬 수 없게 되었다.^[26] 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 공정가스 종류를 바꾸거나 플라즈마 변수(전자밀도, 전자온도, 플라즈마전위 등)를 제어하는 방식이 요구된다. 특히, 전자온도의 제어는 매우 중요하고, 현재까지 이에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다.^[27-30] 대표적인 전자온도 제어 방법들은 그리드 전압에 의한 전자온도강하(0.1eV 이하)방법,^[31] 입력 파워를 펄스로 인가하는 방법^[32]과 전자석 필터를 이용한 전자온도 강하(0.5eV 이하)방법^[33]들이 있다. 이중 펄스를 이용한 방법은 입력 파워 차단 시 전자밀도는 천천히 감소하나 전자온도는 빠르게 감소, 전자가 중성입자에 흡착되어 음이온을 형성할 확률이 매우 높아짐을 이용, 하전입자 대전에 의한 썬치(Notch) 현상을 훌륭히 해결하고 있다.^[34]

4. 플라즈마 모델링

핵융합이나 우주 플라즈마 과학 분야에서 시뮬레이션은 중요한 역할을 하고 있으나,^[35-37] 공정 플라즈마의 다차원적인 시뮬레이션 연구는 아직 초기 개발단계에 있어 실제 산업현장에는 기여하지 못하고 있다. 최근 들어 대면적화 추세와 대면적 장치개발의 상당한 투자 부담을 덜기 위해 시뮬레이션 기술과 모델링 개발은 필수적인 것으로 생각된다. 공정 플라즈마에서 모델링의 어려움은 플라즈마 내의 많은 라디칼들이 가스 상태 반응 및 표면에서의 반응과 플라즈마 수송 및 중성입자들의 운동들이 서로 연관되어 있어 반응 규명에 있어서의 복잡성에 있다. 그러므로 모델링은 공정 변수들(가스 혼합비, 가스 유량, 압력, 파워, 챔버 구조 등)과 설계 변수들(가스의 반응 계수들, 반응속도, 수송계수, 빛 발광 및 흡착계수)을 가지고 중요한 양들의 공간적, 시간적 변화를 기술하고 궁극적으로 식각 속도, 증착속도, 표면 형태의 변화, 손상과 오염 등을 예측할 수 있어야 한다.

공정 플라즈마 모델링에서의 여러 가지 중요 고려사항은 a)방전물리, b)가스 상태 중성 입자들 c)표면 반응 등이다. 방전 물리는 하전입자 수송과 운동학 및 맥스웰 방정식을 포함하고 있다. 하전입자 수송과 운동학은 통상 유체역학 방정식,^[38] 입자 방정식^[39] 또는 이 두 가지 합성으로 기술한다.^[40] 또한, 방전물리는 주로 이온, 전자들과 중성입자들 사이의 충돌에 의한 가스 상태에서의 반응들과 관련되어 있다. 이것은 전자의 운동량과 에너지 분포는 전자들의 이온이나 중성입자들과의 충돌에 의존하고, 반면 중성입자의 밀도와 라디칼들의 분포는 전자들의 물리적인 상태에 의존하기 때문이다. 예로 전자 충돌에 의한 중성입자의 분해는 방전에서 라디칼들의 상태를 상당히 변화시킨다. 이것은 플라즈마에서 가스 상태 중성입자들은 거의 실온 근처에 남아있기 때문에 이온화율은 1-10% 이하일지라도, 분자 분해율은 100%에 달할 수도 있다. 낮은 압력 하에서 중성입자에 의한 표면의 화학적 반응은 표면의 변화 과정, 손상, 표면 및 표면 주위 재료의 오염과 관련되므로 매우 복잡하다. 현재 플라즈마와 표면의 화학적, 물리적 반응의 모델링은 매우 제약되어 있다.

Ⅲ. 공정 플라즈마 발생장치 개발

과거 수십 년 동안, 새롭게 향상된 차세대 반도체/디스플레이 장비들이 개발되어 왔다. 각 장비들은 공정에서 공통적으로 요구하는 조건들(낮은 공정 압력, 고 이온화율, 높은 식각 속도, 좋은 식각 균일도)을 가정 적절히 충족시키는 방향으로 연구, 개발되었다. 이러한 개발방향에 의거 새로운 HDP(High Density Plasma)발생 장치들이 출현하게 되었다. 기존의 CCP(Capacitively Coupled Plasma)는 낮은 공정 압력에서 $10^8-10^{10} \text{cm}^{-3}$ 정도의 낮은 밀도는 보이는 반면, HDP 장치들은 전형적으로 10^{11}cm^{-3} 이상의 높은 밀도를 가지고 있다.^[41] 대부분의 HDP 장치들의 큰 장점 중의 하나는 플라즈마 발생에 필요한 출력들(고주파 및 마이크로파)을 기존 CCP와는 달리 기관 전위에 대해 독립적으로 가할 수 있다는 것이다. 기관의 전위를 독립적으로 제어함으로써 높은 에너지를 가진 이온들에 의한 웨이퍼 손상을 극소화할 수 있을 뿐만 아니라, 공정 물질에 따라 이온 에너지 분포를 제어함으로써 공정 제어의 최적화가 가능해졌다. 웨이퍼 상에서 공정의 균일성을 확보하기 위해 플라즈마의 공간적 균일성 또한 장비 개발에 있어 확보해야 할 중요한 요소이다. 따라서 현 반도체/디스플레이 공정에서는 각 공정에 따라 가장 최적의 특성을 가진 플라즈마 장치들을 이용하고 있으며, 식각 공정에서는 아직까지 CCP 장치가 많이 이용되고 있기도 하다. 아래에서는 현재의 플라즈마 공정에서 이용되고 있는 장치들에 대한 발생 원리 및 특징들에 대하여 논의한다.

1. 축전 결합 방전장치

반도체/디스플레이 제조공정에서 가장 널리 사용되어 온 장치가 축전 결합 장치, 즉 CCP이다. 기본적인 장치의 구조는 일정한 간격으로 유지되어있는 두 전극 판이 있고, 이 두 전극 판에 고주파 입력 파워가 가해진다. 이 장치는 넓은 공정 압력에서 응용이 가능하며, 박막 증착 및 식각 등의 공정에 널리 이용되어 왔다.([표 2] 참조) 낮은 공정 압력에서 입력 파워가 인가된 전극에 웨이퍼를 장착한 뒤 식각할 때 이 장비는 통상 RIE(Reactive Ion Etching)

이라 불린다. 플라즈마 식각 장비의 구조는 웨이퍼를 접지 전극에 장착되어있는 플라즈마 식각이라 불리는 장치의 구조이다. 통상 플라즈마 식각 장비는 높은 공정 압력에서 구동되며, 박막 증착 및 등방성 식각에 주로 이용된다. 축전 결합 방전의 원리는 잘 알려져 있는 바와 같이 이온과 전자의 플라즈마 주파수 사이의 주파수에서 두 전극에 진동하는 고주파 입력 파워가 인가되면, 질량 차이에 의해 이온보다 매우 운동성이 좋은 전자들이 순간적인 전기장에 반응하게 되고, 이온들에 의해 형성된 양전하 내에서 진동을 함으로써 전기장으로부터 에너지를 얻게 된다. 이때, 이온들은 단지 시간적으로 평균되어진 전기장에만 반응하여 쉬스를 형성한다. 전형적인 이온 충돌 에너지는 두 전극에 가해지는 고주파 전압에 의해 결정된다. 이온 충돌 에너지가 비교적 높기 때문에 SiN박막 증착과 같은 공정에서는 박막의 응력 및 박막 조성비의 제어를 위해 높은 에너지의 이온이 필요하기 때문에 유용하지만 선폭, 선택비 및 기관 손상 등을 제어해야 하는 차세대 공정에서는 이온 충돌 에너지가 기관으로 입사하는 이온과 중성 가스의 선속에 대해 독립적으로 제어되어야 한다. 이 장치들은 [표 2]에서 제시된 바와 같이 20m Torr 이하의 공정 압력에서는 효율적인 작동이 불가능하다. 낮

[표 2] 축전 결합 방전과 고밀도 플라즈마 장치들의 전형적인 플라즈마 조건들

플라즈마 변수	축전 결합 방전(CCP)	고밀도 플라즈마(HDP)
공정 압력	20-2000m Torr	0.5-50m Torr
rf 출력	50-2000W	100-5000W
rf 주파수	0.05-13.56MHz	0-2450MHz
반응 용기 부피	1-10 l	2-50 l
플라즈마 단면적	300-2000cm ²	300-500cm ²
외부 자기장	0kG	0-1kG
플라즈마 밀도	$10^9-10^{11}/\text{cm}^3$	$10^{10}-10^{12}/\text{cm}^3$
전자 온도	1-5eV	2-10eV
플라즈마 전위	$\sim 10^2\text{V}$	$\sim 10\text{V}$
이온 선속	$0.1-5\text{mA}/\text{cm}^2$	$5-50\text{mA}/\text{cm}^2$
이온 가속 에너지	200-1000eV	200-500eV
이온화율	$10^{-4}-1\%$	$10^{-2}-10\%$

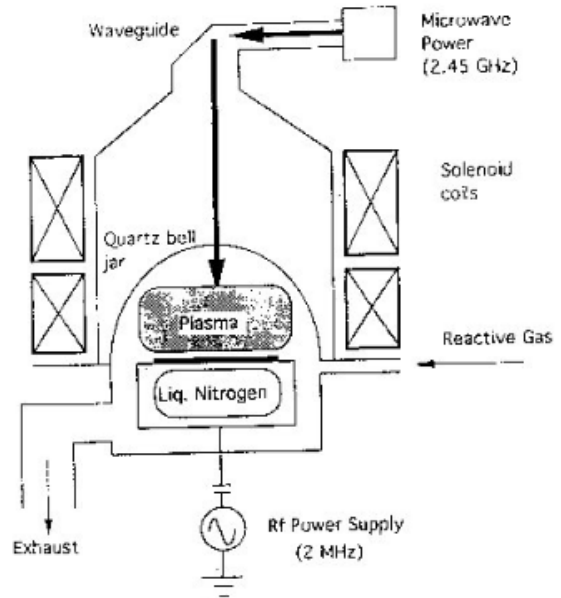
은 공정 압력에서 효율적인 작동과 기판에 입사하는 이온들의 에너지를 낮추기 위해 향상된 MERIE (Magnetically Enhanced Reactive Ion Etcher)라는 장비가 개발되기도 하였다.^[42]

2. 고밀도 플라즈마 발생 장치

축전 결합 방전과 그의 향상된 장치들의 공정 조건의 개선에 있어서의 한계로 인해 새로운 저 압력, 고효율의 플라즈마 발생 장치의 개발이 요구되었다. 이러한 플라즈마 장치들의 공통적인 특징을 살펴보면 우선 50m Torr 이하의 낮은 공정 압력에서 비교적 효율성이 높고 안정적으로 플라즈마를 발생시킬 수 있으며, [표 2]에서 나타낸 바와 같이 기존의 축전 결합 방전에 비해 두 배 높은 플라즈마 밀도를 얻을 수 있다. 뿐만 아니라, 공통적인 특징은 고주파 입력 파워가 두 전극(그중 하나에 웨이퍼가 놓임) 사이에 가해지는 기존의 축전 결합 방전과는 달리 고주파나 마이크로파 파워가 기판과는 별도로 플라즈마에 가해짐으로써 기판에 입사하는 이온의 에너지와 이온 선속이 독립적으로 제어될 수 있다는 것이다. 더욱이 입력 파워의 비축전(non capacitive) 결합으로 인해 전형적으로 20-30V의 낮은 쉬스 전압을 얻을 수 있어, 높은 에너지 이온들에 의한 기판 손실을 최소화할 수 있다. 이러한 장비들은 현재 다양한 공정에 응용되어 상업적으로 큰 성공을 거두기도 하였으며, 많은 응용에 관련된 연구뿐만 아니라 기본 플라즈마 물리연구도 활발히 진행되어지고 있다.

(1) 전자 사이클로트론 공진

마이크로파를 이용한 플라즈마 방전은 세계 2차 대전 시 개발되어진 고출력 마이크로파 장치가 개발된 이후 사용되어져 왔다. [그림 5]는 플라즈마 공정에서 사용되어져 큰 성과를 거둔 일본 Hitachi사의 ECR 장치의 단면도를 보여주고 있다. 이 장치에서는 2.45GHz의 마이크로파 출력이 도파관을 통해 플라즈마로 전달되며, 이 도파관은 통상 방전 장치의 quartz bell jar로 연결된다. 솔레노이드 코일은 발산하는 모양의 자기장을 만들며, 875 가우스^[43] 부근에서 공진 영역이 형성된다. 도파관을 통해 플라즈



[그림 5] Hitachi사의 마이크로파 방전 장치

마로 가해진 마이크로파의 출력은 이 공진 영역에서 자기장을 중심으로 회전 운동을 하는 전자와 공진을 일으키면서 전달된다. 이 장치의 출력 전달 특성상 10^{-5} Torr 이하의 매우 낮은 압력에서도 플라즈마 발생이 가능하지만, 주로 공정에서는 1m Torr에서 20m Torr 사이에서 작동된다.

(2) 헬리콘 플라즈마

전자기파와 플라즈마 내 전자와의 효율적인 상호 작용을 이용하여 고효율을 플라즈마를 발생시킬 수 있는 장치가 헬리콘 플라즈마 발생 장치이다. 이 장치는 Boswell^[44]에 의해 플라즈마 생성원으로 처음 소개되었다. 헬리콘 파와 플라즈마와의 파워 전달 메커니즘에 있어 가장 완성된 이론은 Chen^[45]에 의해 제시되었던 란다우 감쇠효과로 알려져 왔으나, 최근에는 다른 이론들^[46]이 계속해서 제시되고 있어 기초 물리 연구에 큰 관심이 끌려지는 플라즈마 발생 장치라 하겠다. 헬리콘 모드의 전자기파는 다양한 형태의 안테나에 의해 발생되고, ECR에 비해 비교적 약한 자기장을 따라 전파하면서 플라즈마와 결합이 이루어진다. 이 장치 또한, 자기장의 영향으로 공간적으로 균일한 분포의 플라즈마 발생에는 큰 난점을 가지고

있어 실제의 공정에는 크게 이용되어지고 있지 않다. 그러나 이 장치는 큰 이온 선속과 충돌 에너지를 이용해 재료 표면 변형이나 레이저 발생 장치에 큰 응용성을 가지고 있다.

(3) 유도 결합 플라즈마

플라즈마 발생 장치인 유도 결합 플라즈마 장치는 플라즈마 공정에서 가장 많이 이용되고 있다. 이 장치의 가장 큰 특징은 자기장을 사용하지 않고도 전자기파와 플라즈마와의 강한 결합(coupling)이 가능하고, 구조가 간단하다는 점이다. 위에서 제시한 고밀도 플라즈마 발생 장치에 비해 결합 효율의 측면에서 조금 낮은 편이지만 자기장을 사용하지 않으므로 공간적인 균일성 확보에 큰 이점을 가진다. 최근에는 효율을 개선하고, 플라즈마 균일성의 향상을 위해 약한 자기장이 축 방향으로 가하기도 하며, RF 출력 전달에 있어 효율적인 헬리컬 공진 장치가 제안되기도 하였다. RF 안테나는 그 응용 공정에 따라 실린더 장치의 측면이나 상단부에 설치되기도 한다.^[26,47] 이 장치 또한, 기관 바이어스의 독립성을 가지고 기관으로 입사하는 이온의 에너지를 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다. 더욱이 최근에 와서는 12" 이상의 웨이퍼에 응용이 가능한 대면적 플라즈마 장치로의 확장에 이용되기도 한다.

IV. 플라즈마 진단장치

1. 량류어 탐침

량류어 탐침은 매우 단순한 구조를 갖지만 가장 기본적인 플라즈마 변수들(플라즈마의 밀도, 전자온도, 플라즈마 전위, 전자 에너지분포함수 등)을 측정할 수 있다. 이 탐침으로 측정할 수 있는 한계는 플라즈마 밀도의 경우 10^{13}cm^{-3} 까지, 전자온도는 0.1eV부터 수백eV까지이다.

통상 고주파를 사용하는 플라즈마에서 플라즈마 전위는 동일한 주파수로 진동하므로 량류어 탐침에 인가하는 전압을 고주파의 주파수보다 매우 빠르게 변화시키지 못하면 진동하는 플라즈마 전위에 의한 탐침 특성 곡선

이 왜곡된다. 이러한 왜곡을 방지하기 위해 최근에는 고주파의 주파수와 동일한 성분을 제거하는 필터를 사용한다.^[48]

전자 에너지 분포는 측정된 전류를 탐침에 인가한 전압으로 이차 미분하여 구할 수 있다. 이것은 탐침에 인가하는 전압에 진폭이 작은 사인파를 인가할 때 측정되는 전류의 제2조화(second harmonic) 성분의 크기가 전류를 두 번 미분한 값을 가진다는 원리를 이용하여 구할 수 있다.^[49] 통상 플라즈마 내에 존재하는 전자들의 에너지 분포는 맥스웰 분포가 아니므로 전자 에너지 분포 측정은 플라즈마 내에 존재하는 전자들의 운동학적 특성, 플라즈마의 발생 메커니즘과 수송현상 등을 밝히는 데 필요하다.

2. QMS(Quadruple Mass Spectroscopy)

량류어 탐침은 플라즈마 내의 전자에 대한 특성을 측정하는데 반하여 QMS는 전자와의 충돌로 해리된 이온이나, 활성종의 질량 및 에너지 분포를 측정할 수 있다. QMS를 이용하여 중성입자의 질량을 측정할 때는, 필라멘트를 가열하여 튀어나온 열전자를 가속, 중성입자와 충돌시켜 이온을 만든다. 이 이온이 질량필터를 통과하게 되는데, 질량필터는 4중 극자로 이루어져 있고, 이 극에 직류 및 교류 전압을 인가하여 특정한 질량/전하 비를 가지는 입자들만 통과시키게 된다.^[50]

QMS는 주로 플라즈마 내의 이온, 라디칼의 밀도 측정에 이용되며, 실제 공정에서 사용되는 복잡한 기체를 사용할 때도, 각각의 라디칼의 밀도 분포를 측정할 수 있기 때문에 량류어 탐침으로 측정된 전자의 특성과 QMS를 이용한 활성종의 밀도 정보를 이용하여 플라즈마 내에서 전자와 라디칼의 해리에 대한 메커니즘을 밝히는 연구가 활발히 진행되고 있다.

3. OES(Optical Emission Spectroscopy)

OES는 플라즈마 내의 중성 입자나 이온이 전자와의 충돌에 의해 각 입자의 전자가 여기 상태로 올라갔다가 기저상태, 또는 준안정 상태로 천이할 때 나오는 빛을 측정한다. 이온, 또는 중성 입자로부터 나오는 빛의 세기는

전자 밀도 n_e , 측정하려는 입자(이온, 라디칼)의 밀도 N , 그리고 전자 온도 T_e 에 관계된다($I_N = k(T_e)n_e N$). 식에서 볼 수 있듯이 빛의 세기는 대상 입자의 밀도뿐만 아니라, 전자 밀도와 에너지 분포에도 관계된 양이기 때문에 이 양들을 소거해야 한다. 소거 방법 중, 가장 잘 알려진 것으로는 optical actinometry법이 있다. 플라즈마 내에 소량의 불활성 기체(actinomer)를 첨가하고 이 기체로부터 나오는 빛과 측정하고자 하는 입자로부터 나오는 빛의 세기를 비교함으로써 상대농도를 구할 수 있다.^[51]

이온이나 중성종이 전자와 충돌하여 여기, 천이하며 나오는 빛의 파장은 각 입자마다 고유한 특성을 가지는데, actinomer와 측정하고자 하는 입자의 파장들 중에서 전자 에너지에 의한 빛 방출 특성이 비슷한 파장들을 선택, 측정하면 위 식의 k 값이 서로 비례 관계를 갖기 때문에 대상 입자와 actinomer로부터 나오는 빛 세기의 비는 곧 대상입자의 상대밀도가 된다.

따라서 actinomer의 밀도를 일정하게 유지해 주며, 측정하고자 하는 입자로부터의 빛과 actinomer로부터 나오는 빛의 세기를 비교하면 여러 조건에서의 입자 N 의 밀도 변화를 알 수 있게 된다.

4. LIF(Laser Induced Fluorescence)

LIF는 레이저를 이용하여 이온이나 중성입자의 전자를 여기시키고, 낮은 에너지 준위로 천이할 때 나오는 빛의 세기를 측정한다. 중성입자의 밀도를 측정하는 방법으로 Actinometry 등의 방법이 있지만, 측정기체와 actinomer의 선택 폭이 너무 좁고, 공간분포의 측정이 어려운 단점이 있다. 그러나 LIF를 이용할 경우에는 빛의 세기가 레이저의 파워의 함수이고, 입자들의 밀도에 비례하기 때문에 형광의 세기가 직접 입자의 밀도를 나타낸다.^[52]

입사 레이저 파장의 선폴이 아주 작은 파장 가변형 레이저를 이용할 경우에는 중성 종, 이온의 속도분포함수 또한 측정 가능하다. 선폴이 작은 레이저를 사용하여 레이저의 파장을 변화시키면서 형광의 세기를 측정하면 도플러효과에 의한 선폴증가를 측정할 수 있는데, 도플러효과는 입사 레이저의 방향에 대한 입자들의 속도에 따라 $\omega = \omega_0 - k \cdot v$ 의 관계를 가지고, 형광의 세기는 이 식

을 만족시키는 입자들의 수에 비례하므로 레이저 파장을 속도로 변환함으로서 그 입자들의 속도 분포함수를 구할 수 있다. 이 분포 함수를 통해, 실 공간에서의 확산 계수, 밀도 분포뿐만 아니라, 이동 속도, 온도, 속도공간에서의 확산 계수 등을 계산해 낼 수 있으므로 유용성이 매우 크다.

V. 맺음말

앞에서 기술했듯이 현재까지 상당히 개발되지 않은 많은 플라즈마 공정 분야가 있다. 중요하다고 생각되는 것들을 요약하면 아래와 같고 또한, 이것들은 향후 공정 플라즈마의 연구 주제가 될 것이다.

1. 공정변수 제어와 모델링

공정 플라즈마에 대한 플라즈마 진단 분야는 상당히 진보되어 있으나 아직도 반도체/디스플레이 제조공정에 실제 사용될 수 있는 청정 환경의 진단 설비는 아직도 미진한 부분이 많고 수율 향상을 위한 실시간 공정관리용 피드백 분석 설비는 거의 전무하다고 볼 수 있다. 공정 플라즈마에서 공정 변수와 플라즈마 변수 제어는 기초적인 연구뿐만 아니라 공정의 재현성, 공정원가, 신규 공정 개발 등의 관점에서 필수적인 사항이 될 것이고, 반도체/디스플레이 회사들의 사활이 걸린 문제이다.

플라즈마에 관련된 다른 분야에 비하여 모델링과 시뮬레이션은 수준은 많이 뒤떨어져있다, 예로 자기장이 있을 때 플라즈마 수송과 플라즈마 웨이브를 연계시키는 모델링은 아직도 논란이 되고 있다. 실제적인 가스 상태와 표면 화학을 관련시키는 모델들은 아직 유년기에 지나지 않는다.

2. 공정 플라즈마에서 먼지 입자, 손상과 오염

마이크론 크기(0.1um) 이하의 미세 먼지 입자는 반도체/디스플레이가 고집적화 됨에 따라 수율, 디바이스 성능 및 신뢰성에 치명적인 영향을 미친다. 이것은 챔버벽 스퍼터링, 반응 생성물의 폴리머,^[53] 응력을 받은 벽면에 증착된 박막^[54] 등으로부터 생성된다. 오염 관점에서 보

면 매우 낮은 밀도의 입자들이라도 분명히 웨이퍼에 치명적인 손상을 준다. 통상 이들은 실험용 웨이퍼 상에서 빛의 산란 방법을 이용하여 간접적으로 검출하는데, 최근에는 플라즈마 상태에서 레이저의 산란을 이용하여 직접적으로 검출하는 방법이 도입되어 발생 메커니즘과 해결 방법에 대한 상당한 진전이 있었다. 한편 플라즈마에서 충분한 밀도를 가지고 있는 입자들은 플라즈마 균일도에 영향을 주어 간접적인 문제를 일으킨다. 이 오염원들은 사용하는 가스, 외부 공기와 챔버 재질 등이므로, 이들의 유입을 억제하기 위한 필터 개발과 화공 약품에 의한 세정 기술이 연구되고 있다. HDP 생성원이 도입된 후 이온 충돌에 의한 플라즈마 손상은 상당히 개선되었으나 축전 전하에 의한 손상은 더욱 심각해졌는데 이것에 대한 공정에서의 해결 방법은 아직 미진한 상태이며 회로 설계방법으로 해결하고 있다.

3. 대면적 플라즈마 발생 장치 개발

앞에서 기술한 고밀도 플라즈마 장치들의 개발은 12" 웨이퍼 크기의 현 플라즈마 공정에 초점을 맞추어 개발되어 왔다. 그러나 VLSI공정이 미세화와 고 집적화의 추세로 감에 따라 반도체 원가와 수율 관점에서 반도체 장비는 450mm 이상의 대면적화 추세가 지배적이고, 디스플레이 장비는 8세대 이상 장비 개발이 활발할 것으로 예측된다. 따라서 최근 수 년 전부터 웨이퍼의 대면적 추세에 발맞춰 플라즈마 장비의 대면적화가 서서히 대두되고 있다. 대면적 플라즈마 장비의 개발은 미국을 비롯해서 일본 등에서 활발히 연구되기 시작하고 있으며, 몇 가지 장비들이 제시된 바 있다. 현재 가장 큰 문제점은 안테나의 임피던스 감소와 플라즈마 밀도의 공간 균일성 확보이다. 지금까지 대면적으로 크기 확장이 가능한 최적의 고밀도 플라즈마 장비로는 평판형 유도 결합 플라즈마 장비로 본 실험실에서도 이러한 장비 구조에서 크기 확장이 가능한 플라즈마 안테나를 제시한 바 있다.^[55] 최근 일본의 NEC사의 Samukawa^[56]와 그의 팀에서 500MHz의 대면적 플라즈마 장비를 제시한 바 있다. 장래에는 대면적 플라즈마 장비를 개발한 국가에서 반도체/디스플레이 사업의 주도적인 역할을 할 것으로 여겨져, 이에 대한 많은 참여가

기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. R. Roth, *Industrial Plasma Engineering*(IOP, Bristol, 1995), Vol.1.
- [2] Y. P. Razier, *Gas Discharge Physics*(Springer-Verlag, Berlin, 1991).
- [3] J. W. Coburn and H. F. Winters, *Ann. Rev. Mater. Sci.* **13**,91(1983).
- [4] D. L. Tolliver, *The History of Plasma Processing in VLSI Electronics Microstructure Science*(Academic Press, Florida, 1984), Vol.8.
- [5] S. M. Irving, *Kodak Photoresist Sem. Proc.*, Vol.2, May, (1968)
- [6] S. Fang, S. Murakawa and J. P. Mcvittie, *IEEE Trans. Electron Devices* **41**,1848(1994).
- [7] S. Ma, J. P. Mcvittie, and K. C. Sarawat, *IEEE Trans. Electron Device Lett.* **16**,534(1995).
- [8] C. H. Chien, C. Y. Chang, H. C. Lin and T. Y. Huang, *IEEE Trans. Electron Device Lett.* **18**,33(1997).
- [9] W. Kern and V. S. Ban, *Thin Film Processes*(Academic, New York, 1978).
- [10] W. Kern and G. L. Schnable, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-26**,647(1979).
- [11] E. C. Douglas, *Solid State Technol.* **24**,65(1981).
- [12] H. F. Sterling and R. C. G. Swann, *Solid State Electron* **8**,653(1965)
- [13] A. R. Reinberg, *Electrochemical Soc.* 91 (1976).
- [14] H. Dun, P. Pan, F. R. White and R. W. Douse, *J. Electrochem. Soc.* **128**,1556(1981).
- [15] V. S. Nguyen, *Electrochem. Soc. Ext. Abs.* **83-1**, 216(1983).
- [16] W. Kern and R. S. Rosier, *J. Vac. Sci. Technol.* **14**,1082 (1977).
- [17] G. M. Samuelson and K. M. Mar, *J. Electrochem. Soc.* **129**,1773(1982).
- [18] K. Koyama, K. Takasaki, M. Maeda and M. Takagi 3rd, *Symp. Plasma Processing*, Vol. 82-6, *Electrochem. Soc.* 479 (1982).
- [19] W. A. Bryant, *J. Electrochem. Soc.* **125**,1534(1978).
- [20] J. K. Chu, M. S. Thesis, University of California, Berkeley (1982).

- [21] K. Akimoto and K. Watanabe, Appl. Phys. Lett. **39**,445(1981).
- [22] M. Sugawara, Practical Dry Etching Process, Realize, Tokyo, (1992).
- [23] J. Proud and R. A. Gottscho, *Plasma Processing of Materials, Scientific Opportunities and Technological Challenges*(National Academy, Washington, 1991).
- [24] E. S. G. Shaqfeh and C. W. Jurgensen, J. Appl. Phys. **66**,4664(1989).
- [25] S. M. Rosnagel, J. J. Cuomo and W. D. Westwood, *Handbook of Plasma Processing Technology*(Noyes Publication, New Jersey, 1990).
- [26] Y. Hikosaka, M. Nakamura and H. Sugai, Jpn. J. Appl. Phys. **33**,2157(1994).
- [27] I. Alexeff and W. D. Jones, Appl. Phys. Lett. **9**,77(1966)
- [28] K.R.Mackenzie, R. J. Taylor, D. Cohn, E. Ault and H. Ikezi, Appl. Phys. Lett. **18**,529(1971)
- [29] N. Herschkowitz, M. H. Cho and J. Pruski, Plasma Source Sci. Technol. **1**,87(1992)
- [30] N. Sato, S. Lizuka, T. Kozumi and T. Takada, Appl. Phys. Lett. **62**,567(1993)
- [31] K. Kato, S. Lizuka and N. Sato, Appl. Phys. Lett. **65**,816 (1994).
- [32] S. Ashida, C. Lee and M. A. Liberman, J. Vac. Sci. Technol. **A13**,2498(1995).
- [33] A. J. T. Holmes, Rev. Sci. Instrum. **53**(10),1523(1982).
- [34] T. H. Ahn, Ph.D. -Thesis, University of Nagoya, Nagoya, Japan, March (1997).
- [35] T. Tajima, *Computational Plasma Physics: Applications to Fusion and Astrophysics*(Addison-Wesley, CA, 1989).
- [36] C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*(McGraw-Hill, New York, 1985).
- [37] R. W. Hockney and J. W. Eastwood, *Computer Simulation Using Particles*(OP., Bristol, 1988).
- [38] A. D. Richards, B. E. Thompson and H. H. Sawin, Appl. Phys. Lett. **50**,492(1987)
- [39] C. K. Birdsall, IEEE Trans. Plasma Sci. **19**,65(1991).
- [40] R. K. Porteous, H. M. Wu and D. B. Graves, Plasma Sources Sci. and Technol. **3**,25(1994).
- [41] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*(John Wiley and Sons, New York, 1994).
- [42] C. T. Gabriel and J. P. MoVittie, Solid State Technol. **81** (1992).
- [43] J. E. Stevens, Y. C. Huang, R. L. Jarecki and J. L. Cecchi, J. Vac. Sci. Technol. **A10**,1270(1992).
- [44] R. W. Boswell, Phys. Lett. **A33**,457(1970).
- [45] F. F. Chen, Plasma Phys. and Control. Fusion **33**,339(1991).
- [46] K. P. Shamrai, V. P. Pavlenko and V. B. Taranov, Plasma Phys. Control. Fusion **39**,505(1997).
- [47] J. Hopwood, Plasma Sources Sci. Technol. **1**,109 (1992)
- [48] V. A. Godyak, R. B. Piejak and B. M. Alexandrovich, Plasma Sources Sci. Technol. **1**, 36 (1992).
- [49] G. R. Branner, E. M. Friar and G. Medicus, Rev. Sci. Instrument **34**,231(1962).
- [50] F. M. Ma and S. Taylor, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol. **143**,71(1996).
- [51] G. Bruno, P. Capezzuto and G. Cicala, J. Appl. Phys. **69**,7256(1991).
- [52] R. A. Gottscho and T. A. Miller, Pure Appl. Chem. **56**,189(1984).
- [53] A. A. Howling, J. L. Drier and C. Hollenstein, Appl. Phys. Lett. **62**,1341(1993).
- [54] J. S. Logan and J. J. McGill, J. Vac. Sci. Technol. **A10**,1875(1992).
- [55] G. H. Bai, S. H. Seo and H. Y. Chang, J. Korean Vac. Soc. **7**,273(1998).
- [56] S. Samukawa and T. Nakano, J. Vac. Sci. Technol. **A14**,1002(1996).

저 자 약 력

장 흥 영



- 1977년 : 서울대학교 원자력 공학과 학사
- 1980년 : 한국과학기술원 물리학과 석사
- 1986년 : 미국 아이오와대학교 물리학과 박사
- 1980년 3월~1983년 7월 : 강원대학교 전임강사
- 1986년 3월~1987년 8월 : Lehigh University, Research Associate
- 1987년 9월~1996년 8월 : KAIST 부교수
- 2002년 9월~2003년 2월 : 물리학과 학장
- 1996년 9월~현재 : 한국과학기술원 KAIST 물리학과 교수
- 관심분야 : 플라즈마 분광법, 플라즈마 공정, 플라즈마 진단