

서상훈 연구교수
(KAIST 물리학과)

1. 서론

플라즈마를 이용한 반도체 공정의 난이도가 계속 증가함에 따라, 공정의 재현성, 해당 공정조건의 안정성의 향상에 대한 요구가 함께 증가하고 있다. 이러한 요구들을 달성하기 위해서는 박막에 직접적으로 작용하는 플라즈마의 특성을 파악하는 것이 필수적이며, 이를 위해 여러 가지 방법들이 사용되고 있다. 여기서는 대표적인 플라즈마 특성 측정 장치인 Langmuir Probe와 Optical Emission Spectroscopy(OES), 그리고 고주파 특성을 측정하는 V/I Probe에 대해 알아본다.

2. 플라즈마 특성 측정장치의 종류

2.1 Langmuir Probe

Single Langmuir Probe는 전자 밀도, 이온 밀도, 전자 온도, 이온 포화전류, 전자 에너지 분포함수를 측정할 수 있는 장비로, 다음 그림과 같이 하나의 금속 탐침(Probe)과 여기에 전압을 인가할 수 있는 가변 전원, 그리

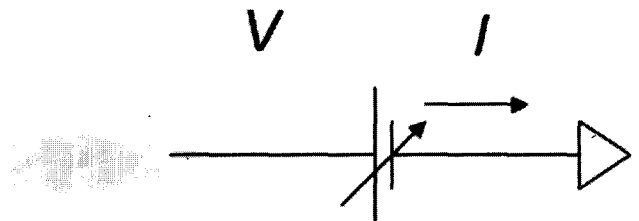


그림 1. Single Langmuir probe의 구조.

고 탐침을 통해 흐르는 전류를 측정할 전류 측정 도
구로 이루어진다.

Langmuir Probe은 금속 탐침을 플라즈마에 삽입
하고 탐침에 전압을 인가하여 플라즈마로부터 전자
전류나 이온 전류를 추출하여 특성을 분석하는 방식
인데 이때 얻게 되는 기본적인 정보는 인가한 전압
에 대한 전류와의 관계 그래프이다. 이것을 I-V 곡선
이라 부르며 이를 분석하여 이온 포화전류 밀도, 플
라즈마 밀도, 전자 온도, 플라즈마 전위, 부유 전위,
전자 에너지 분포함수 등의 정보를 얻을 수 있다.

탐침 전압(V_b)을 플라즈마 전위(V_p)보다 증가시
킬 경우에는 전자만 탐침에 입사한다. 이때 탐침으로
입사되는 전류는 전자에 의한 전류이며 이상적인 탐
침이라면 이 구간에서는 전자에 의한 전류는 전압에
관계없이 일정해야 하며 이를 전자 포화전류라고 한
다. 실제로는 전압에 대해서 전류가 일정하지 않고
증가하는 양상을 보이는데 이는 탐침의 전압이 증가
함에 따라 탐침 주변의 쉬스의 면적이 커지면서 탐침
의 면적이 점점 커지는 효과가 생기기 때문이다.

V_p 보다 탐침전압이 감소하면, $e(V_p - V_b)$ 보다 높
은 에너지를 갖는 전자만 탐침에 입사하고, 이보다
낮은 에너지를 갖는 전자는 포텐셜 장벽을 넘지 못
해 반사된다. 따라서, 전자들의 에너지 분포가
Boltzmann 형태를 가질 경우, 이 구간에서 나타나는
전자에 의한 전류는 지수 함수의 형태로 나타난다.
한편 특정한 전압에서 탐침에 흐르는 전류는 0이 되

며, 이 전압 V_f 를 부유 전위(Floating Potential)라 부
른다. 이것은 탐침으로 입사되는 양전하와 음전하의
양이 같아지기 때문에 발생하는데 플라즈마에 전기
적으로 부유된(Floating) 물체를 삽입하면 물체의 표
면에 형성되는 전위이기도 하다.

V_b 가 V_f 보다 더 감소할 경우, 전자에 의한 전류는
매우 감소하고, 이온에 의한 전류가 더 커진다. 이 영
역에서는 $V_b > V_p$ 조건에서와 비슷하게, 전압을 감
소시켜도 전류의 크기가 많이 변하지 않게 되는데,
이 전류를 이온포화전류라 부른다. $V_b > V_p$ 조건의
에서 기술한 바와 같이 평면형 프로브를 사용할 경우
에는 이곳의 전류는 V_b 를 계속 감소시켜도 더 이상
변화하지 않지만, 다른 형태의 프로브를 사용할 경
우에는 쉬스 변화와 이온의 Orbital Motion에 의해
조금씩 변하게 된다.

위의 특성 곡선으로부터 플라즈마 변수를 추출하
며, 이 곡선의 이차미분을 포함한 몇 단계의 계산을
통해 전자 에너지 분포함수(Electron Energy
Distribution Function; EEDF)를 구하게 된다. Single
Langmuir Probe는 가장 많은 종류의 플라즈마 변수
를 측정하며, 특히 EEDF를 측정할 수 있는 거의 유
일한 도구이다. 이러한 장점을 바탕으로 Single
Langmuir Probe는 플라즈마 발생 메커니즘을 규명
하는 연구에 활발하게 사용되어 왔으며 측정방법과
해석방법이 지속적으로 발전하고 있다. Single
Langmuir Probe의 측정법에서 매우 비중 있게 다루
어지는 부분이 RF 전력을 이용하여 발생된 플라즈
마에서 나타나는 I-V 특성곡선의 왜곡을 교정하는
방법이다. Single Langmuir Probe는 플라즈마에 이
용되는 Probe 중에서 가장 대표적이고 정밀한 계측
을 보장하지만, RF 플라즈마에서는 세심한 주의가
필요하다. RF 플라즈마에서는 플라즈마 전위가 RF
주파수로 진동하며 I-V 특성곡선 측정에 왜곡을 일
으키는데, 이를 해결하기 위해 해당 주파수에서 임
피던스가 매우 커지는 공진필터와 탐침의 쉬스 임피
던스를 낮추기 위한 RF 보상 전극을 사용한다.

2.2 Double Langmuir Probe

Double Langmuir probe는 이온밀도, 전자온도와
이온포화전류를 측정할 수 있는 장비로서, 그림 3과
같이 두개의 금속 탐침과 그 탐침에 전압을 인가할

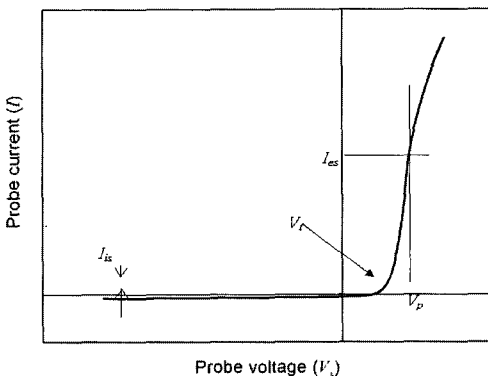


그림 2. Single Langmuir probe의 I-V 특성 곡선.

수 있는 가변전원, 그리고 탐침을 통해 흐르는 전류를 측정할 전류 측정 도구로 이루어진다.

전압변화에 대한 전류의 특성곡선을 I-V 특성곡선이라 부르며 대표적인 I-V 특성곡선은 그림 4와 같다.

이 특성 곡선을 해석함으로써 이온 밀도와 전자 온도, 이온 포화전류를 구할 수 있다. Double Langmuir Probe의 I-V 특성곡선은 Single Langmuir Probe와 달리 원점에 대해 대칭이다.

Double Langmuir Probe는 Single Langmuir Probe와 비교해 볼 때, 측정 가능한 플라스마 변수의 종류가 적고, 전자 에너지 분포함수를 측정할 수 없어서 자세한 전자 에너지의 분포 구조를 알 수 없는 단점이 있다. 그러나, double Langmuir Probe는 Single Langmuir Probe가 갖지 못하는 다음의 두 가지

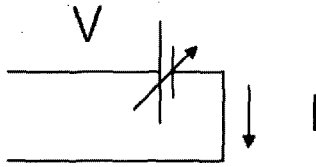


그림 3. Double Langmuir probe.

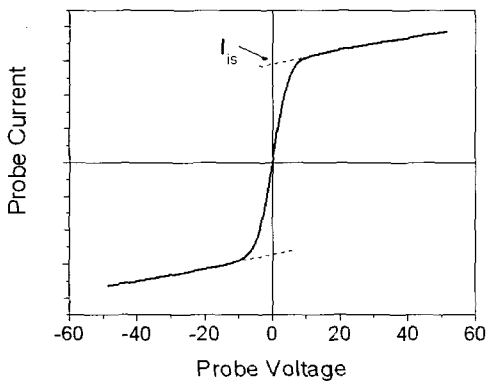


그림 4. Double Langmuir probe의 I-V 특성곡선.

장점을 지닌다.

- 전기적으로 절연된 구조 : Single Langmuir Probe와 달리 측정 회로가 전기적으로 절연되어 구성되므로, 플라스마 전위 변화에 의한 I-V 특성곡선의 왜곡이 적고, 플라스마 전위가 매우 높거나 낮을 때도 측정이 가능하다. 이는 특히 반도체, 디스플레이 공정에서 챔버의 내부 표면이 전기적으로 절연되어 플라스마 전위가 명확하게 정의되지 않는 환경에서 강점으로 작용한다.
- 플라스마에 주는 섭동(Perturbation)이 적다 : Double Langmuir Probe를 통해 흐르는 전류는 최대 크기가 이온 포화전류와 동일하므로, 적은 전류를 포집하여 측정함으로써 플라스마 방전상태에 주는 섭동이 적다. 이러한 특성으로 인해 고출력 RF 전력으로 혹독한 환경이 형성되는 공정 장비에서의 측정에 적합하다.

2.3 Triple Langmuir Probe

Triple Probe는 다음 그림과 같이 Double Langmuir Probe의 가변전원을 고정전압 전원으로 대체하고, 금속 탐 하나를 더 사용한 구조를 갖고 있다.

앞에서 설명한 Single과 Double Langmuir Probe는 모두 특성곡선을 측정해야 하므로 한 조건에서의 플라스마 변수를 측정하기 위해서는 반드시 전압을 변화시키며 전류를 측정해야 하지만 Triple Probe는 전압을 변화시키며 측정할 필요 없이 그림5의 전류 I

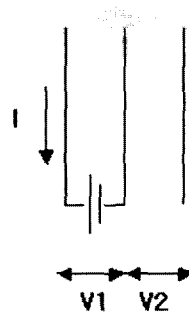


그림 5. Triple Langmuir probe.

와 전압차 V_1 , V_2 만 측정하면 되므로 고속 측정에 용이하고, 해석 알고리즘이 비교적 간단하다. 그러나, 이 측정 방법은 전자온도 측정 결과의 오차가 상대적으로 큰 단점이 있어서 널리 사용되지는 않으며, 플라즈마 방전의 지속시간이 매우 짧은 핵융합 연구 분야나 펄스 플라즈마의 경우에 한해 부분적으로 사용되고 있다.

이상의 Langmuir Probe에 의한 측정 방식은 플라즈마에 대한 다양한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있지만 실제 공정에서는 부식성 가스로 이루어진 공정용 플라즈마에 금속 팁이 노출된다는 점에서 양산 공정에 적용되기에는 부적절하다. 그래서 이러한 Langmuir Probe은 반도체 및 디스플레이 공정용 장비 또는 공정을 개발하는 곳에서는 주로 사용된다.

한편 양산 공정을 감시하고 분석하는 장비는 공정에 영향을 주지 않으며 측정할 수 있는 간접적 측정 방식이 많이 사용되는데 그 중 가장 많이 사용되는 방법이 분광기술을 이용한 기술이다.

2.4 Optical Emission Spectroscopy(OES)

Optical Emission Spectroscopy(이하 OES)는 원자/분자/이온의 분광학적 특성을 이용하는 방법이다. 플라즈마에 존재하는 고에너지 전자가 원자에 충돌할 경우, 원자 내에 속박된 전자의 에너지 준위가 상승했다가 다시 낮은 에너지 상태로 천이할 때, 빛이 나오게 된다. 이때 방출되는 빛은 원자의 종류에 따라 서로 다른 파장을 갖게 되므로, 빛의 파장을 분석

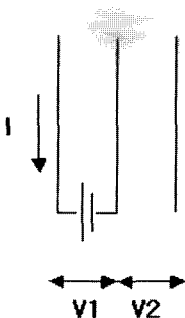


그림 6. Optical emission spectroscopy의 원리.

하여 어떠한 원자 또는 분자가 플라즈마 내에 존재하는 지 알아낼 수 있다.

OES는 반도체 장비 중에서 특히 식각장비에 널리 사용되고 있다. 식각은 웨이퍼 위에 형성된 박막을 깎아내는 공정으로서, 대부분 특정한 물질의 박막만을 선택적으로 식각하게 된다. 이 때, 해당 박막층의 식각이 진행 중인지 아니면 식각이 완료되었는지를 판단하는데 OES가 사용된다. 그림7에서 볼 수 있듯이, 물질 A로 이루어진 박막을 식각할 때는, A물질의 화합물이 부산물로 플라즈마 내에 존재하게 되며, 식각이 종료되어 갈수록 A 화합물의 양이 줄어들게 된다. OES를 이용하여 A 화합물이 방출하는 파장의 빛을 식각공정 중에 관찰할 경우, 식각이 완료될 경우 빛의 세기가 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있으며 이를 식각공정을 중단하는 기준으로 사용한다.

2.5 I-V Monitor

양산에 적용될 수 있는 방법으로서 플라즈마 발생에 사용되는 전극이나 코일에 전압, 전류 및 전력 계수, 그리고 파형의 고조파(Harmonics) 등을 검출할 수 있는 센서를 삽입하여 이들의 물리량을 플라즈마의 변화, 공정의 변화와 연관시켜 통계적으로 공정을 감시하고 분석하는 장비들도 있다. 이러한 장비는 보통 I-V Monitor로 불리는데 MKS, AE, Scientific Systems 등의 회사가 제품으로 공급하고 있다. 이들은 주로 RF 매칭박스를 지나 플라즈마 소스로 연결되는 RF 전력선로에 부착되어 플라즈마 챔버의 임피던스를 측정하는 장비이다.

그림8은 I-V Monitor를 축전결합형 플라즈마 발생장치에 적용한 예로서 이 장비가 적용되는 위치와

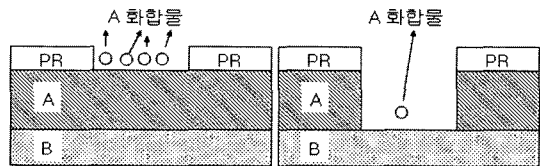


그림 7. 식각공정시 생성되는 화합물.

신호변화를 간략히 보여준다. 플라즈마 임피던스는 전류와 전압, 그리고 위상차를 측정함으로써 얻어지는데, 이 장비는 이 물리량들의 4차 Harmonics까지 측정한다. 이 물리량들은 플라즈마의 상태에 매우 예민하게 반응하는데, 플라즈마 밀도나 전자 온도는 물론이고 플라즈마 내에 존재하는 불순물의 양이나 챔버 벽의 표면상태의 미세한 변화도 측정값에 큰 영향을 미친다. 이러한 특성을 이용하여 적용할 수 있는 응용분야는 다음과 같다.

- 공정 변화 추적 : 하나의 챔버, 또는 챔버와 챔버 사이에서의 공정변화를 탐지, 기록, 추적하는데 이용할 수 있다. RF 전류와 전압, 위상차를 측정하므로 RF 전력선의 접지 접속 오류를 즉각 탐지할 수 있다. RF Bias는 웨이퍼에 고에너지 이온을 입사하기 위해 반도체 공정 전반에 이용되는데, 웨이퍼 공정 중의 미세한 전류, 전압, 위상차 변화를 감지하며, E-chuck Coupling의 미세한 변화도 감지한다.
- 전력측정 : RF 전력 공급장치에서 출력된 에너지는 Matching Box나 전송선로를 지나며 점차 소모되어 출력 에너지보다 적은 에너지가 플라즈마로 전달된다. 실제로 전달되는 전력을 측정함으로써 공정 변수 설정시 보다 실제적인 접근을 가능케 한다.
- 식각 공정에서의 End Point Detection: 공정의

종료 시에 나타나는 미세한 변화는 쉬스 임피던스에 영향을 끼치며, 이 변화를 쉽게 감지한다.

· 챔버 세정시 End Point Detection: 챔버 벽에 흡착되어 있던 불순물들을 제거하는 세정 공정에서는 불순물의 양에 따라 챔버의 임피던스가 변하게 되어 이 변화를 감지하여 종료시점을 알아낸다.

3. 결론

기존에 사용되는 플라즈마 특성 측정 방법들은 주로 연구를 목적으로 많이 사용되었으나, 지속적인 반도체/평판디스플레이 산업의 발전으로 인해 플라즈마를 감시하고 이상유무를 사전에 차단할 수 있는 Monitoring 장비들에 대한 수요가 급증하고 있다.

이러한 수요 증가는 크게 두 가지 이유에서 야기되었는데, 첫번째는 기판 크기 증가로 인해 공정 실패시 감수해야 할 피해액이 증가했기 때문이며, 두번째는 소자의 밀도가 증가하여 선평이 계속 좁아짐에 따라 기존보다는 매우 정밀하게 공정을 제어해야 하기 때문이다.

소자 밀도의 증가는 끝없이 증가하고 있으면, 반도체의 경우 450 mm 웨이퍼 공정에 대한 논의가 시작됨에 따라 플라즈마 모니터링에 대한 수요는 지속적으로 증가할 것으로 보인다.

저자약력



성명 : 서상훈

◆ 학력

- 1992년 한국과학기술원 물리학과 이학사
- 1995년 한국과학기술원 물리학과 이학석사
- 2000년 한국과학기술원 물리학과 이학박사

◆ 경력

- 1996년 - 1997년 General Atomics Visiting Researcher
- 1996년 - 1997년 UCSD Visiting Scholarship
- 2000년 - 2002년 삼성전자(주) 책임 연구원
- 2005년 - 2005년 충북대 디스플레이공학과 시간강사
- 2003년 - 현재 한국과학기술원 연구 조교수

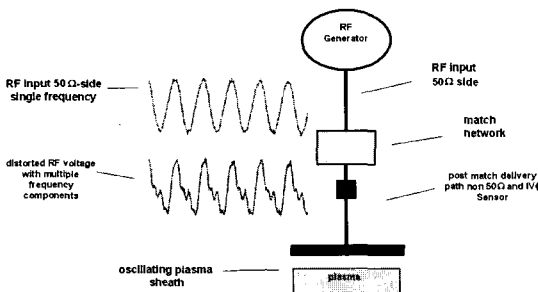


그림 8. I-V monitor (SmartPIMTM, Scientific Systems, Inc.).