

## 플라즈마의 생성

플라즈마를 만들기 위해서는 자연상태의 원자나 분자를 이온화 시켜야 한다. 그러기 위해서는 높은 열을 가해주어야 한다. 즉 수십만도에서 수백만도의 고온이 필요하다. 그러나 높은 전계를 가해주면 낮은 온도에서도 원자나 분자를 이온화시킬 수 있게 된다. 예를 들면 아르곤(Ar)가스의 경우 1 mTorr ~ 100 Torr사이의 압력에서는 1cm당 100 V이상의 전계만 있어도 플라즈마를 생성시킬 수 있다. 원자나 분자가 이온화하기 위해서는 전기장에 의해 가속된 자유전자나 이온과 충돌해야 하는데 이때 3가지의 상태를 갖게 된다.

첫 번째가 반발(atom elastic collision)이다. 충분히 가속되지 못한 전자나 이온이 충돌했을 때인데 이때에는 아무런 변화가 없게 된다.

두 번째가 이온화(Ionization)이다. 가속된 자유전자나 이온과 충돌하여 새로운 이온을 만들고 또 하나의 자유전자를 만들게 된다.

세 번째가 여기(excitation)와 발광(relaxation)이다. 가속된 자유전자나 이온이 이온화에는 충분하지 않지만 충돌된 원자에 에너지를 공급하여 최외각전자를 페르미 준위보다는 낮은 궤도 올려놓게 된다. 그러나 이 궤도는 불안정하기 때문에 다시 원래의 궤도로 돌아오면서 빛에너지를 발산하게 된다. 이때 발산하는 빛은 원자마다 최외각 전자가 올라갈 수 있는 궤도가 정해져 있기 때문에 일정한 색을 지니게 된다.

위의 세 가지의 충돌현상을 보면 이온화되기 적절한 조건을 찾을 수 있다. 즉 첫 번째의 경우에서와 같이 가속이 덜된 상태에서의 충돌은 이온화에 영향을 주지 못하며, 또 충돌할 확률이 낮아도 이온화하는데 더 어렵게 된다. 즉 이온화를 쉽게 하기 위해서는 적당한 압력과 적당한 전압이 필요하게 된다. 압력이 높아서 입자가 많이 지면 평균행정거리(mean free pass)가 짧아지기 때문에 전압이 높더라도 이온화하기 어렵고, 압력이 너무 낮으면 충돌할 확률이 낮아지기 때문에 이온화하기 적당한 압력이 필요하게 된다.

### - 플라즈마의 특성

#### 1) 전기적 특성

플라즈마는 원자나 분자에 속박되지 않은 전자를 많이 갖고 있기 때문에 외부에서 전계를 걸어주면 전류를 흘릴 수 있는 특성이 있다. 전기 전도도는 일반고체와는

달리 온도가 올라갈 수 록 증가하며(3T/2), 온도가 약 1000만도 이상 일 때 구리와 같이 전기 전도도 값을 가지게 된다.

## 2) 자기적 특성

플라즈마 내부에 있는 전자와 이온들은 자계를 걸어주면 운동방향이 자계방향과 직각으로 원 운동하게 되며 이러한 방식으로 플라즈마를 한쪽에 잡아 놓을 있다. 이러한 플라즈마의 자기적 특성을 이용하여 플라즈마를 원하는 곳에 집중시킬 수 있게 되고, 플라즈마의 밀도가 높아지면 플라즈마의 전기 저항이 낮아지게 된다. 즉 이러한 자기적 특성을 이용하면 전압을 상승시키지 않고도 높은 밀도의 플라즈마를 생성시킬 수 있다.

## 3) 화학적 특성

플라즈마 내부에는 이온과 자유전자가 열운동을 하기 때문에 분자나 원자를 여기, 전리시킬 수 있다. 이렇게 여기 또는 전리된 분자들이 다른 분자나 원자들과 반응을 쉽게 할 수 있게 된다. 이와 같은 특성을 이용한 것이 PECVD(Plasma Enhanced CVD)와 RIE(Reactive Ion Etching)등이다.

## - Chamber안에서의 DC 플라즈마

### 1) DC 플라즈마 일반

음극부분을 cathode라고 부르며 양극부분을 anode라고 부르고 각 전극과 플라즈마 사이를 sheath라고 부른다. 플라즈마 내부의 전위가 양전위를 나타내는 이유는 다음과 같다. 원래 플라즈마 내부의 이온과 자유전자의 수는 동수이나, cathode와 anode 사이에서 걸리는 전계로 인하여 이온과 자유전자가 운동에너지를 받게 된다. 이때 이온과 자유전자가 받는 운동에너지는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2}m_{ion}V_{ion}^2 = \frac{1}{2}m_{electron}V_{electron}^2$$

$$m_{ion} \gg m_{electron}$$

$$V_{ion} \ll V_{electron}$$

즉 이온이나 자유전자가 받는 운동에너지는 같으나 질량의 차이가 많이 나므로 전자의 속도가 이온의 속도에 비하여 매우 빠르다. 이 때문에 전자는 anode에 흡수될

때 이온은 cathode에 흡수되지 못하고 남아있게 된다. 그렇게 해서 플라즈마 내부의 전위는 느리게 움직이는 이온에 의하여 양의 전위를 갖게 된다.

플라즈마내부의 양이온들은 음전위의 cathode쪽으로 운동에너지를 받게 되고 cathode sheath 내에서  $V_p - V_c$ 의 전위차에 의하여 가속되게 된다. 이렇게 가속된 이온은 cathode를 때리게 되고 이 힘을 이용하여 sputtering이나 etching등의 공정에 이용하게 된다. 이때 cathode에 도달한 이온은 cathode에서 전자를 공급받아 다시 정상적인 원자나 분자로 환원되게 된다. 이렇게 하여 chamber 내부의 전기적 균형을 이루게 된다. 그러나 cathode가 전기를 통하지 못하는 부도체일 경우 cathode에서 이온에게 전자를 제공하지 못하기 때문에 cathode 표면에 이온이 쌓이게 된다. 이온이 많이 쌓여지게 되면 cathode면은 양전위를 띠게 되어 이온은 더 이상 오지 못하게 되고, 플라즈마내부의 전기적 평형상태가 깨지게 되어 수 usec내에 플라즈마가 없어지게 된다. 이러한 현상 때문에 부도체를 sputtering, etching등을 할 때는 RF generator와 같은 교류전원을 사용한다. 교류 전원을 사용하면 electrode에 부착된 부도체 표면에 주기적으로 양전위를 가해주게 되어 표면에 쌓이는 이온을 떨어뜨리게 된다. 요즘 DC를 이용하여  $SiO_2$ 등의 부도체를 sputtering하는데 이것은 주기적으로 target에 양전위를 공급해줌으로써 가능해졌다. 이것이 DC pulsed power이다.

## 2) Sheath영역의 전기적 모형

Sheath영역의 전기적 모형은 chamber를 전기적인 회로로 변환시켜 해석할 수 있기 때문에 매우 유용하다. 플라즈마는 양의 전위를 갖고 있고, electrode는 음의 전위를 갖고 있다. 이것은 플라즈마와 electrode를 하나의 capacitor로 볼 수가 있게 된다. 그리고 전자와 이온의 흐름을 각각 저항과 다이오드를 결합한 회로로 해석할 수 있다. 이 때 전자와 이온은 플라즈마에서 electrode쪽으로부터 움직이게 된다. 이러한 전기적 모형은 RF power를 이용해서 플라즈마 chamber를 구성할 때 chamber 내부의 전기적 상황을 해석하는데 매우 유용하게 사용할 수 있다.

## - Chamber안에서의 RF 플라즈마

### 1) RF 플라즈마의 구분

DC 전원만 가지고는 불가능한 process를 하기 위하여 사용한다. 즉 이온을 두 방향으로 운동시키려 할 때, 부도체를 sputtering, etching, PECVD 하려 할 때, 부도

체에 voltage biasing 할 때 사용하며, DC의 경우 한쪽방향으로만 전계에너지를 받으나 RF의 경우에는 그 방향이 계속해서 바뀌지게 되므로 DC 보다 10배에서 100배까지 빠르게 이온화시킬 수 있다. 또 혼합 가스등을 사용할 경우 DC보다 훨씬 쉽게 원자분해를 할 수 있다. 일반적으로 RF를 이용한 chamber의 경우 크게 두 가지의 경우로 나눌 수 있다. 즉 cathode쪽에 DC biasing을 걸어주는 asymmetrical system과 특별하게 DC biasing을 원하지 않고 플라즈마 전압만을 할 때 사용하는 symmetrical system이 있다.

## 2) Asymmetrical System

Asymmetrical system이란 말 그대로 비대칭적인 구조의 chamber로서 cathode쪽에 특별한 DC biasing을 원할 때 사용한다. 비대칭적인구조라 함은 RF전원을 공급받는 cathode의 넓이가 ground와 접속된 anode보다 작은 것을 말하며 이 때 생기는 특별한 DC Bias를 바로 Self DC Bias라고 부른다.

## 3) Symmetrical System

Symmetrical system은 두 개의 electrode의 면적이 같은 경우이다. 이때는 cathode쪽에 특별한 DC값이 걸리지 않는다. 플라즈마의 전위는 RF power값에 의하여 결정되며 이온은 특별한 방향성 없이 기존에 가지고 있던 운동방향으로만 운동하며, 이러한 운동성을 이용하여 chamber cleaning등에 사용하며, 최근에는 2개의 다른 전원을 사용하여 sputtering을 할 경우 플라즈마를 쉽게 만들기 위하여 보조 전원으로도 사용된다.

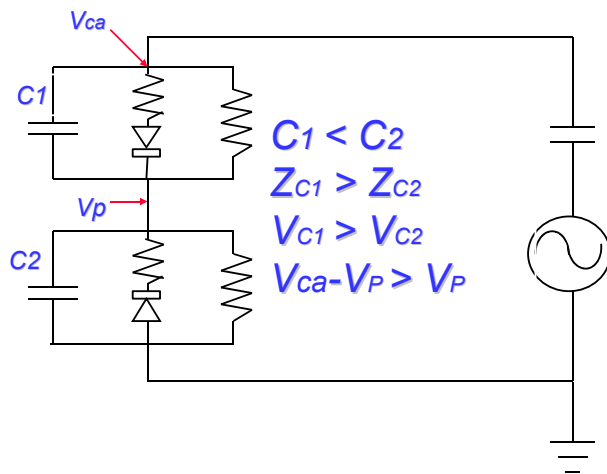
### - 입자운동을 이용한 해석

RF 신호에 있어서 이온과 전자간의 운동속도와 운동거리를 먼저 생각하여야 한다. 13.56MHz에서의 이온의 이동거리는 수 micrometer 밖에는 움직이지 못하고 전자가 겨우 5 cm정도 움직인다. 전기장의 세기가 증가하면 이온과 전자의 운동거리도 증가하겠지만 이온보다는 전자의 이동거리와 속도가 훨씬 크다. 위와 같은 이온과 전자의 운동성을 가지고 Cathode가 음의 전위(-)를 갖고 anode가 양의 전위(+)를 가지면 플라즈마 내에 있는 전자들이 음의 전위(-)를 갖는 anode쪽으로 몰리게 되며 이때 anode의 면적이 넓기 때문에 모두 anode에 흡수된다. 그리고 cathode가 양의 전위(+)를 갖게 되면 플라즈마 내부의 전자들은 cathode쪽으로 몰리나 cathode의 면적이 anode에 비하여 훨씬 작기 때문에 모두 흡수되지 못하고 cathode위에

머물러 있게 된다. 이렇게 교류의 전원이 계속해서 공급되면 cathode쪽에 흡수되지 못한 전자들이 몰려있는 것같이 보이게 되는데 이것에 의하여 cathode전위는 음의 전위(-)를 띠며 이것이 바로 self DC bias이다. 이렇게 생성된 self DC bias에 의하여 플라즈마 내부의 이온들이 cathode쪽으로 몰려가게 된다.

### - 전기적 회로를 이용한 해석

플라즈마 공정용 chamber을 전기회로적 모형을 만들면 다음 그림과 같다. 이 그림에서  $V_{ca}$ 는 cathode에 걸리는 전압이고,  $V_p$ 는 plasma 전압이며  $C_1$ 과  $C_2$ 의 Capacitor는 각각 플라즈마와 cathode, 플라즈마와 anode사이에 형성되는



capacitor값들이다. 회로를 해석하는데 있어서 저항값과 diode값 등은 직접 플라즈마 내부의 입자들의 흐름으로 결정되므로 회로에 큰 영향을 주는 것은  $C_1$ 과  $C_2$ 의 Capacitor값이 된다. Capacitor는 DC 전원 일 때는 전류의 흐름을 차단하지만 교류 전원일 때는 저항의 역할을 하게된다. 저항성분의 크기는 아래의 식과 같다.

$$Z_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

즉 capacitor량에 따라 반비례하여 저항성분( $Z_c$ )가 변화한다. 또 capacitor의 용량은 아래의 식과 같이 마주보고 있는 판의 넓이에 비례하고, 거리에 반비례하며, 유

전율에 비례한다

$$C1 = \epsilon \frac{A}{l}$$

위의 그림에서 보면 asymmetrical system의 경우 anode의 면적이 cathode면적보다 작기 때문에  $C1 < C2$ 가 되고, capacitor 용량에 의한 저항성분은  $Zc1 < Zc2$ 가 되며. Ohm의 법칙에 의해서 각각의 capacitor에 걸리는 전압은  $Vca - Vp$ ,  $Vp$ 와 같이 되고, 그 값은  $|Vca - Vp| > |Vp|$ 가 된다. 위의 식을 바탕으로 self DC bias의 크기는 cathode와 anode와의 면적에 따라 결정됨을 알 수 있다. (실제 전류의 양을 이용하여 계산하면 면적의 4제곱에 비례한다.) 그러나 cathode에 걸리는 물질의 유전율이 클 경우에는  $C1$ 의 요량이 커지게 되어 self DC bias가 낮아지는 경우도 있다. 결과적으로 asymmetrical system에서의 self DC bias voltage의 값은 electrode의 면적비의 4제곱에 비례하고, RF power 값에 비례하며, 주입되는 process gas량에 따라서도 증감하며 이온은 이 DC bias에 의해 가속되어 cathode 쪽을 향하게 된다.