평면형 PLASMA 시스템에서의 방전 전압에 관한 연구

김 종 식 ° 강 봉 구 * 권 오 대 *
* 포항공과대학교 전자공학과

A STUDY OF DISCHARGE VOLTAGE IN PLANER PLASMA SYSTEM

JONG-SIK KIM, BONG-KU KANG, O'DAE KWON
Dept. of Electronic Eng. POSTECH

〈 ABSTRACT 〉

As a first phase of plasma study intended for semiconductor processing research, we have studied the discharge phenomena. In particular, we have obtained a specific formula for the breakdown voltage as a function of the neutral state pressure of reactive gases. Our experimental results with H2,O2,Ar,CF4 seem ro verify this formula. In addition we find the voltage levels for various gases in the descending order of CF4)O2≒Ar)H2 in high pressure region, while H2)CF4)O2)Ar in low pressure region. When H2 and CF4 were mixed, we observe the overall voltage dominated by the gas with lower breakdown volotage.

I. 서 론

반도체 공정에서 리소그래피 기술은 집적화를 하기 위해 매우 중요한 기술이다. 플라즈마를 이용한 건식 공정은 습식 공정의 문제점을 해결하여 매우 광범위하게 사용되고 있다. 특히 두개의 평면 전극사이에 RF 전압을 가하여 플라즈마를 얻는 평면형 전극 시스템은 건식 에칭과 sputtering에 가장 많이 사용되고 있다. [1]

그러나 이런 평면형 건식 식각 장치에 있어서 그 이론적인 연구가 미비하여 공정변수(RF power, 반응관의 압력, 반응기체의 유속)와 에칭 특성(선택성, 방향성, 에칭속도)와의 관계가 정확히 규명되어 있지 못하여 건식 공정에서의 플라즈마 특성에 대한 이론적인 연구와 이를 바탕으로한 건식 공정의 모델화에 대한 연구가 필요하다. [2]

본 연구는 평면형 식각 장치에 있어서 이론적 체계를 세우기 위한 첫번째 시도로써 방전 전압의 반응관 기체 압력에 대한 변화를 고찰하려 한다. 먼저 방전 전압을 예측하기 위하여 전자의 평균 에너지 개념을 이용한 간단한 모델을 제시하였다. 모델에 의하면 방전 전압은 저기압 (10 mtorr 이하) 에서는 기압에 반비례하여 선형적으로 증가하고, 반면 고기압 (100 mtorr 이상) 에서는 기압에 비례하여 선형적으로 증가한다. 이러한 현상을 여러가지 기체에서 실험적으로 증명하였다.

또한 각 기체의 방전 전압을 비교하여보면 저압에서의 기체 방전 전압의 분포와 고압에서의 방전 전압의 분포가 서로 틀린 결과를 얻는다. 이 현상에 대한 원인을 고찰하였다.

한편 에칭을 할 때 에는 두가지 이상의 혼합 기체를 흔히 사용 한다. 따라서 혼합 기체의 방전 전압을 측정하고 혼합비에 따라 방전 전압의 분포를 조사하였다.

II. 방 전 이 론

진공 반응관에 RF 전압을 가하였을때 기체 내의 자유 전자는 AC 전장에 따른 운동을 하게된다. 이때 전자는 균일하게 분포하고 정지해 있는 입자들과 충돌에 의해 에너지 잃게된다.[4] 이때, 전자의 운동 방정식에서 전자의 평균 운동 속도는 다음식으로 주어진다.

$$v = (eE) / m \cdot \nu_m / (\nu_m^2 + \omega^2) \quad ...(1)$$

m : 전자 질량, ν_m : 충돌 주파수
ω : 전장의 주파수

전자의 단위 시간당 평균에너지는 식(2)로 주어진다.

$$P = eEv \quad .....(2)$$

고압($\nu_m > \omega$)에서는 전자의 자유 진행 거리가 작고 따라서 탄성 충돌에 의해 전자의 에너지가 기체입자에 전달된다고 가정하면, 기체입자가 얻는 평균 에너지는 식(3)으로 표현된다.

$$E_m = P / \nu_m = (eE)^2 / (m \nu_m^2) \quad ....(3)$$

(ν_m : 탄성 충돌 주파수)

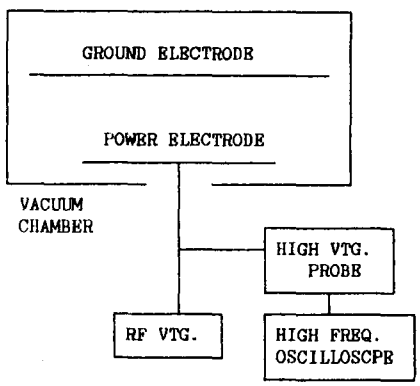


그림 1

입자가 얻는 에너지 Ea가 입자의 이온화 에너지 보다 크면 입자의 이온화가 일어난다. 이때 필요한 최소 전계 E는 식(4)로 주어진다.

$$E = ((\mu_i / e\lambda)m)^{1/2} \cdot \nu_m \quad \cdots\cdots(4)$$

$$(\nu_m = (8kT_e / \pi m)^{1/2} \cdot n \sigma_m)$$

(σ_m : 탄성 충돌 단면적)

(μ_i : 이온화 에너지)

(n: 입자 밀도)

식(4)를 정리하면 식(5)으로 표현된다.

$$E = ((\mu_i / e\lambda)m)^{1/2} \cdot (8kT_e / \pi m)^{1/2} \cdot n \sigma_m \quad \cdots\cdots(5)$$

저압에서는, 전자의 자유 진행 거리가 길어서 전자의 운동 에너지가 입자를 이온화 할 수 있도록 충분히 크다. 따라서 충돌시 완전 이온화가 가능하다.[5] 이때, 입자가 얻는 에너지는 $E_a = P / \nu_i$ 이다. 한편, 전자의 전자의 자유 진행 거리가 크기 때문에 충돌하지 않고 확산에 의해서 소멸하는 전자를 고려해야 한다. 그러므로 저압에서 방전이 성립하려면 $\nu_i / D = 1 / \Lambda^2$의 조건이 만족해야 한다.

(ν_i : 이온화 주파수 , D : 확산 계수 ,

Λ : 확산 거리)

이때 $D = v \cdot \lambda_e$ 이므로,

입자가 얻는 에너지는

$E_a = (e E \Lambda^2) / \lambda_e$ 이다

$(\lambda_e = 1 / (n \sigma))$

(λ_e : 전자 자유 진행 거리)

따라서 방전을 하기 위한 최소 전계는 (6)식으로 표현된다.

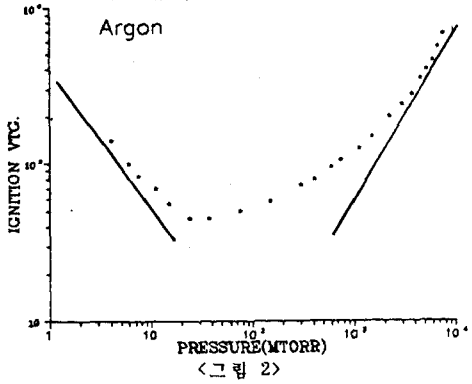
$$E = (\mu_i / e) / (\Lambda^2 n \sigma_i) \cdots(6)$$

(σ_i : 이온화 충돌 단면적)

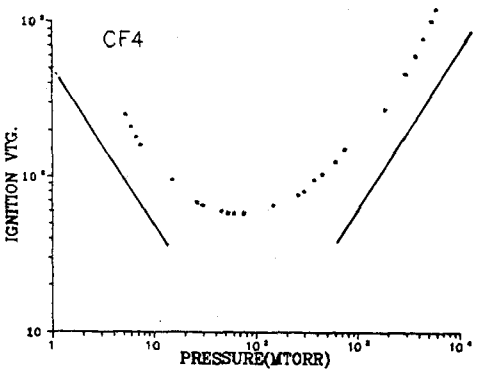
III. 실 험

본 연구에서는 그림 1과 같은 시스템을 사용하였다. 윗 전극은 접지되어 있고, 아래 전극에 RF 전압을 가하였다. 전극과 반응관의 벽면은 두 전극 사이 보다 커서 전극 사이의 방전만 고려하면 된다. 방전 전압의 측정은 HP HIGH VOLTAGE PROBE를 HP HIGH FREQUENCY OSCILLOSCOPE에 연결하여 측정하였다. 측정 요령은 방전이 일어 날때 전압의 파형이 갑자기 떨어지므로 이때의 값을 측정하였다.

실험은 아르곤,산소,수소,CF4 기체에 대하여 방전 전압과 반응관의 관계를 살펴 보았다. 그리고 CF4와 수소의 비율을 10:1, 1:1, 1:10 으로 변화시키면서 방전 전압의 분포를 조사 하였다.



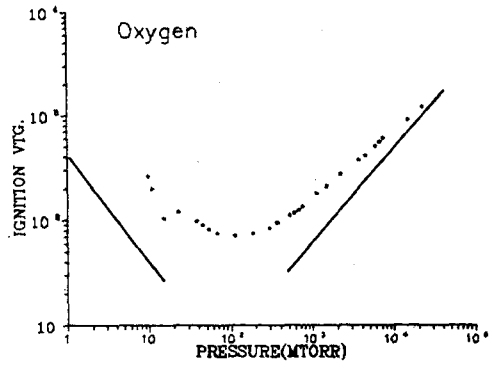
<그림 2>



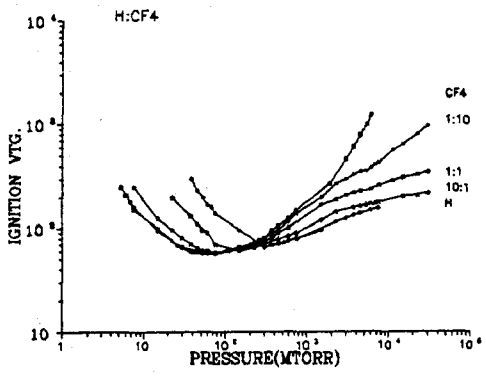
<그림 3>

먼저, 아르곤의 방전 전압을 예측하기 위해 식 (5),(6)을 사용하여 방전 전압을 계산하였다. 이때, 이온화 에너지는 15.8eV 이고,[7] $\sigma_i = 1.5 \cdot 10^{-15}cm^2$, $\sigma_m = 7 \cdot 10^{-16}cm^2$ 을 가정하였다. 그리고, $n = 3.5e15$ P 의 관계식을 대입하였다. V = E d 의 관계식을 이용하여 식 (5),(6),을 풀어보면 저압에서는 V = 482 / Pn(mtorr), 고압에서는 V = 0.063 Pn(mtorr)의 관계식을 얻는다. 그림 2은 아르곤의 방전 전압에 대한 그림이다. 여기서 실험값은 점으로 표시하였고, 모델에 의한 계산값은 실선으로 표시하였다. 그림에 의하면 계산 값은 10mtorr이하와 100mtorr 이상에서 잘 들어 맞고 있음을 알수 있다. 실험값은 계산값보다 큰 값을 가지는데, 이는 식 (5), (6)이 방전 하는데 필요한 최소 전계를 구하는 식이기 때문이다. 사용한 시스템의 한계로 1KV 이상의 전압을 가할 수가 없어서 1mtorr 이하와 10torr 이상의 압력에서는 실험을 하지 못 하였다.

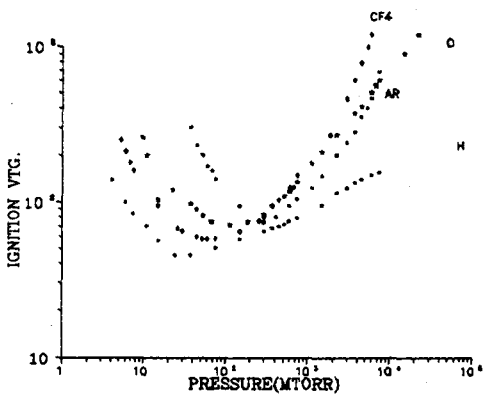
산소,CF4 의 방전 전압의 분포는 그림 3와 그림 4으로 표시하였다. 이때, 산소와 CF4의 방전 전압을 구하기위해 산소의 경우 이온화 에너지를 12.1eV, CF4의 이온화 에너지를 13.9eV로 대입 하였다. 그리고 σ_m 과 σ_i 는 아르곤의 계산 때와 같은 값을 가정하였다. 이때에는 계산값이 아르곤의 경우와 다르게 실험값이 계산값에 2-5배 정도 차이를 나타내고 있다. 그 까닭은 기체의 종류에 따라 충돌 단면적이 차이가 나는데 이것을 무시하고 같은 값을 대입해서 나타나는 결과로 생각된다.



<그림 4>



<그림 5>



<그림 6>

그림 6는 기체의 방전 전압 분포를 비교하기 위한 그림이다. 고압에서는 방전 전압의 분포가 CF4 > 산소 = 아르곤 > 수소 순서로 분포한다. 이는 탄성 충돌시 에너지의 전달이 입자의 질량에 반비례 함으로, 질량이 무거울수록 에너지 전달이 어렵기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 저압에서는 수소 > 산소 > CF4 > 아르곤 의 분포를 갖는다. 이는 저압에서는 이온화 에너지 크기에 따라 방전 전압이 결정되기 때문으로 생각된다. 이때 아르곤의 이온화 에너지가 가장 큼에도 불구하고 방전 전압이 가장 작은데 차후 고찰이 필요하다.

그림 5는 CF4와 수소의 혼합기체의 혼합비에 따른 방전 전압의 분포이다. 대체적으로 혼합비에 비례하여 방전 전압이 결정됨을 알 수 있다. 한편, 고압에서는 수소의 곡선에 접근하고, 저압에서는 CF4의 곡선에 접근 하는 현상을 보인다. 이는 혼합 기체의 방전 전압이 낮은 방전 전압을 갖는 기체에 의해 결정 되는 현상을 보인다고 해석된다. 이러한 현상은 추가 실험으로 더욱 고찰될 것이다.

IV 결론

모델에서 예측한 바와 같이 방전 전압은 저압과 고압에서 선형적인 특성을 보임이 확인되었다. 또한 압력이 10-100mtorr에서 최소값을 가지고, 전체적으로 파센의 법칙을 따르고 있다. 고압에서는 CF4의 방전 전압이 가장 높았고, 저압에서는 수소의 방전 전압이 가장 높았다. 혼합 기체의 방전 전압은 혼합비에 비례 하여 결정 된다.

< 참고 문헌 >

[1] B. Chapman Glow Discharge Process (Wiley, New York. 1980)
[2] V.A. Godyak, Sov. J. Plasma Phys. Vol 2, 78 ,(1979)
[3] C.Brown, Introduction to Electrical Discharge in Gases (Wiley, New York. 1965) pp 99, 177
[4] E.Kunhardt, Electrical Breakdown and Discharges in Gases (Plenum Press, New York. 1983) pp 348
[5] F.Thompson, J.Appl. Phys. 60, (1986)
[6] F.Field, Electron Impact Phenomena (Academic Press,New York.1957) pp 106
[7] J.Novak, J.Appl. Phys. Vol 55, 107 (1984)