2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

Cl_2 방전에서의 기판 표면 이온 각 분포 함수의 유동속도 의존성 조사

유동훈, 권득철, 이종규, 윤남식, 김정형*, 신용현*
충북대학교, *표준과학연구원

Investigation of depending on ion drift velocity for board surface ion angular distribution function in Cl_2 discharge

Dong-Hun Yu, D. C. Kwon, J. K. Lee, N. S. Yoon, J. H. Kim*, Y. H. Shin*
Chungbuk National University, *Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - 현재 널리 쓰이는 고밀도 플라즈마 장치의 식각 시뮬레이션은 식각 패턴으로는 level set method이며 바이어스가 인가된 sheath model로는 Riley sheath model이 보편적으로 받아들여지고 있다. 이러한 식각 시뮬레이션은 *RF*(Radio Frequency) sheath로부터 가속된 이온이 단위 입체각당 특정지점에 이온 플럭스 분포함수, 이온 에너지 분포함수와, 중성종의 수송모델로 etch rate을 결정하는 과정과 level set method을 이용하여 식각 형태를 계산하는 과정으로 구성되어있다. 본 연구는 식각 형태 계산 이전의 단계로서 Ar^+, Cl_2^+, Cl^+이온의 유동속도와 밀도를 장치의 radial방향으로 불균일하게 가정하였고, 가정한 값으로 이온 플럭스와 에너지 플럭스에 대한 영향을 알아보았다.

1. 서 론

고밀도 플라즈마 장치는 식각, 증착, 스퍼터링 등에 널리 사용되고, 특히 반도체나 LCD-TFT같은 미세 식각이 필요한 경우 유용하게 사용된다. 미세 식각에 플라즈마 장치를 사용하면서 식각을 수행하기전에 식각 시뮬레이션을 하는 것이 중요해 졌다. 식각 시뮬레이션에서 중요한 요소 중 하나는 이온과 기판의 충돌현상이다. 이온 과 기판의 충돌 현상은 이온 에너지 분포함수(ion energy distribution function)와 이온 각 분포함수(ion angular distribution function)로 요약되어질 수 있다.[1] 이온 에너지 분포함수는 이온이 주어진 충돌 에너지를 가지고 기판에 충돌할 확률이고 이온 각 분포함수는 이온이 기판의 수직방향에 대하여 주어진 충돌각으로 충돌할 가능성이다. 식각 과정에서의 이온 충돌현상의 중요성에 대해서는 현재 여러 그룹에서 활발한 연구가 이루어지고 있다.[2-5]

본 연구에서는 넓은 주파수 대역에서 단일화된 sheath model인 Riley's sheath model[6]과 ion velocity distribution function[7]을 결합하고, Ar^+이온[8]과 Cl_2^+이온의 ion flux distribution function(IFDF)과 ion energy distribution function(*IEDF*)을 이용하여[9], 장치의 radial 방향으로 불균일한 플라즈마가 형성되었을 때의 밀도와 유동속도가 IFDF와 IEDF에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다.

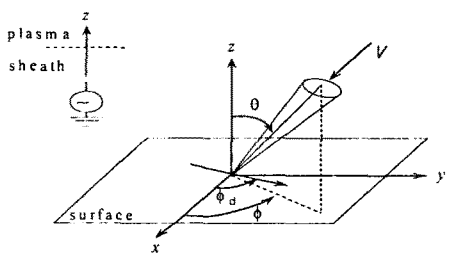

그림 1 Ion angular disrtibution fuction에 대한 해석적 해의 좌표

2. 본 론

2.1 Riley sheath model

sheath안에서 이온의 운동은 sheath edge에서의 전자온도와 이온의 밀도에 의존한다. Riley sheath model은 시간에 의존적인 wall potential(real potential)과 기판에서 이온이 충돌할 때 경험하게 되는 wall potential(damped potential)을 제시하였다. Reley's sheath model은 넓은 주파수대역에서 단일화된 sheath 현상을 제시하여 현재 널리 인정되고 있다.

Riley's sheath model은 일차원모델이다. 이온이 z방향으로 sheath를 충돌 없이 통과하며, 이온의 열속도는 무시하고(cold ions), 전자는 sheath edge에서 전자의 열속도로 열적 평형상태라고 가정하면 sheath에서의 전기장은 Poisson's equation을 이용하여 계산할 수 있다.[6]

damped potential은 다음과 같은 relaxation equation에 의해 계산된다.

$$\frac{\partial \Phi_{d,i}}{\partial t} = -\frac{(\Phi_{d,i} - \Phi)}{\tau_i} \tag{1}$$

τ_i는 이온(Ar^+, Cl^+, Cl_2^+)이 Debye length를 통과하는 시간이다. 이는 Debye length와 Bohm velocity의 비로 결정된다.

$$\tau_i = (\varepsilon_0 m_i / e^2 n_{e,0})^{1/2}$$

Poisson's equation에 sheath내의 전자와 이온밀도를 대입하고 이를 한번 적분하면 sheath내의 전기장에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$E^2 = E_0^2 + \left(\frac{2 k_B T_e}{\varepsilon_0}\right)\left\{ Z_i n_{i,0} \frac{\Phi}{\Phi_{d,i}} \left[\sqrt{\left(1 - \frac{2e\Phi_{d,i}}{k_B T_e}\right)} - 1\right] + n_{e,0}\left(\exp\left(\frac{e\Phi}{k_B T_e}\right) - 1\right)\right\} \tag{2}$$

E_0는 sheath edge에서의 전기장이고 이는 0라고 가정한다. sheath내에서 포텐셜이 sinusoidal한 형태로 가정하는 이론과 전류가 sinusoidal한 형태로 가정하는 이론이 주를 이루는데 sheath는 비선형이기 때문에 실제 포텐셜은 sinusoidal한 형태가 아니다. 따라서 본 연구에서는 sheath내에서 전류밀도가 sinusoidal한 형태로 가정하였다. 총 전류밀도는 이온과 전자에 의한 전도전류와 변위전류의 합으로 나타내어 진다.

$$j_{tot}(t) = -\frac{1}{4} e \sqrt{\left(\frac{8 k_B T_e}{\pi m_e}\right)} n_{e,0} \exp\left(\frac{e\Phi}{k_B T_e}\right) + Z_i n_{i,0} u_{b,i} + \varepsilon_0 \left(\frac{\partial E}{\partial \Phi}\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \Phi_{d,i}}\frac{\partial \Phi_{d,i}}{\partial t}\right) \tag{3}$$

식 (2)를 식 (3)에 대입하고 식 (1)와 결합하여 Φ와 $\Phi_{d,i}$에 대한 일차 비분방정식을 수치적으로 계산한다. 그림 2는 장치의 radial방향의 불균일한 플라즈마를 가정한 그래프이고, 비교점으로 선택된 Ⅰ~Ⅳ들에서의 값은 Table 1.과 같다.

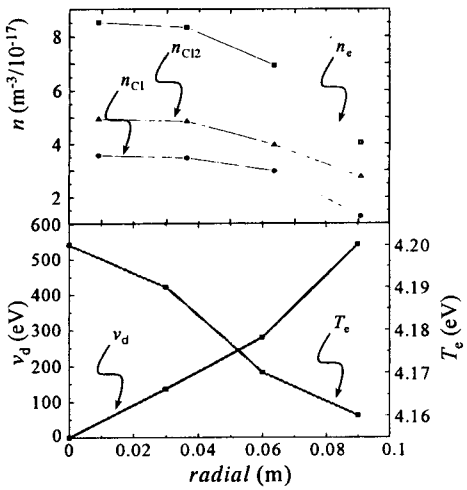

그림 2 장치의 radial 방향의 전자밀도, 전자온도, ,유동속도, Cl_2이온밀도, Cl이온밀도

Table 1. 각 점의 조건

번호	r (m)	n ($m^{-3}/10^{17}$)		n_e ($m^{-3}/10^{-17}$)	T_e (eV)	v_d (m/s)
		Cl^+	Cl_2^+			
I	0	3.57	4.9497	8.5197	4.2	0
II	0.03	3.47	4.8497	8.3197	4.19	135.8391
III	0.06	2.97	3.9497	6.9197	4.17	279.4496
IV	0.09	1.27	2.7497	4.0197	4.16	543.0206

그림 3은 1 (MHz)에서 Cl_2^+, Ar^+이온의 전류-전압 곡선을 나타낸 것이다. 아래의 그래프를 이용하여 Ar이온은 파워를 100 (W)로 고정하여 전류와 전압을 계산하여 전류밀도(j_0=157.19 A/m^2)를 계산하였고, Cl_2^+이온은 500 (W)로 고정하여 전류밀도(1 MHz : j_0=84.1 A/m^2, 50 MHz : j_0=849.64 A/m^2)를 계산하였다. 앞으로의 계산 조건은 위와 동일하다.

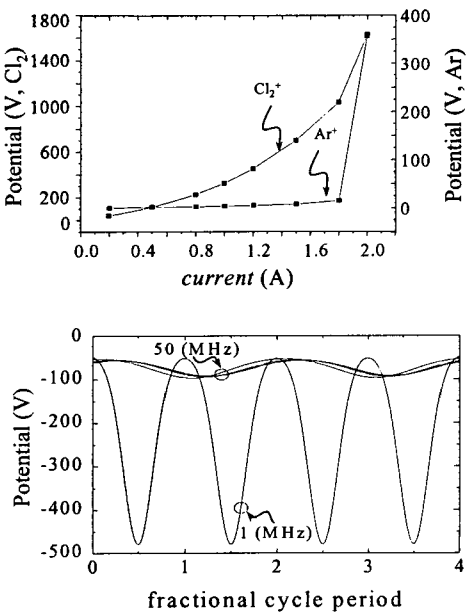

그림 4 기판에서의 sheath potential과 damped potential

그림 3은 Riley's sheath model에서 사용된 결과 값이다. 기판에 걸어준 주파수는 1 MHz와 50 MHz이고 아르곤 이온에 대하여 real potential Φ_s와 damped potential $\Phi_{i,s}$을 계산한 것이다. Cl이온의 밀도는 3.57×10^{17} m^{-3}, Cl_2이온의 밀도는 4.9497×10^{17} m^{-3}, 전자의 밀도는 이온들의 합인 8.5197×10^{17} m^{-3}이고, sheath edge에서의 전자온도는 4.2 eV이다. 1 MHz의 경우 이온이 sheath를 통과하는 시간이 *RF* 주기보다 작으므로 이온이 sheath potential에 의해 영향을 받게 되며, damped potential이 sheath potential과 거의 흡사하게 된다. 50 MHz의 경우는 이온이 sheath를 통과하는 시간이 *RF*의 주기보다 크므로 sheath potential에 의해 영향을 덜 받게되어 damped potential이 sheath potential에 비해 줄어들게 된다. 이는 Ar^+이온의 결과와 같다[8].

2.2 Ion angular distribution

Ion angular distribution은 기판에서(z=0) 이온 속도 분포 함수를 가정하여 나타낼 수 있다. 이온 속도 분포 함수는 충돌이 없고 sheath내에서 방향성을 지닌다고 가정하면, 이온 속도 분포함수는 이온속도의 x, y방향 성분과 x, y평면과 평행한 방향을 갖는 이온 유동속도를 이온온도 T_i로 주어지는 Maxwellian 분포로 주어지고, z방향 성분은 델타 함수로 표현 할 수 있다.

$$f(V_x, V_y, V_z) = \left(\frac{m_i}{2\pi k_B T_i}\right)\exp\left\{-\frac{m_i}{2\pi k_B T_i}[(V_x - v_d\cos\phi_d)^2 + (V_y - v_d\sin\phi_d)^2]\right\}\times\delta(V_z - V_{z,s}) \quad (12)$$

$V_{x,y,z}$는 이온의 x, y, z방향의 속도, $V_{z,s}$는 dmaped potential에 의해 가속된 z방향의 이온속력인 $v_{i,s}$에 의해 결정되는 이온 충돌속도이다.

$$v_{i,s} = -V_{z,s} = \left(\frac{2e|\Phi_{i,s}|}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Ion angular distribution function은 두 개의 형태로 정의 될 수 있는데 하나는 ion flux distribution function(IFDF)으로 이는 그림 1에서 보는 바와 같이 각 θ와 ϕ를 갖는 방향으로 기판에 도달하는 단위 입체각당 이온 입자 flux이다. 나머지 하나는 ion energy distirbution function(IEDF)으로 이는 각 θ와 ϕ를 갖는 방향으로 기판에 도달하는 단위 입체각당 이온 에너지이다. IFDF은 식 (12)를 사용하여 다음과 같이 주어진다.

$$F_{IADF}(\theta,\phi,t) = n_{i,0}\,u_{B,i}\left(\frac{m_i}{2\pi k_B T_i}\right)\frac{v_{i,s}^2}{\cos^2\theta}\left(\frac{1}{2}\,m_i\frac{v_{i,s}^2}{\cos^2\theta}\right)^l \times\exp\left\{-\frac{m_i}{2k_B T_i}[(v_{i,s}\tan\theta\cos\phi - v_d\cos\phi_d)^2 + v_{i,s}\tan\theta\sin\phi - v_d\sin\phi_d)^2]\right\} \quad (14)$$

l=0이면 IFDF이고 l=1이면 IEDF이다.

2.2.1 Time-averaged ion angular distribution function

일반적으로 표면식각과정의 time scales는 *RF* time scales보다 매우 크기 때문에 이온 충돌현상을 설명하는데 주기의 평균적인 IADF가 필요하다. 주기의 평균적인 IADF는 다음과 같이 정의된다.

$$F_{IADF}(\theta,\phi) = \frac{1}{\tau_{rf}}\int_t^{t+\tau_{rf}} F_{IADF}(\theta,\phi,t)dt \quad (15)$$

본 연구에서는 식 (14)을 simpson rule을 사용하여 수치적으로 계산하였다.

2.4 결 과

그림 2에서 보는 바와 같이 장치의 radial방향의 각 비교점(Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)에서 각 밀도들과 이온 유동속도의 조건을 Table 1.에 제시하였다. 이온들(Cl^+,Cl_2^+)의 온도는 0.1 (eV)로 일정하다고 가정하였다. 그림 1에서 이온 유동속도가 이온 유동속도 각(ϕ_d)로 x, y평면과 평행하게 진행한다고 가정하였다. 이때 기판 표면의 x-z평면의 2차원 IEDF와 IFDF의 결과 값을 보기 위해 ϕ=0°로 놓았다.

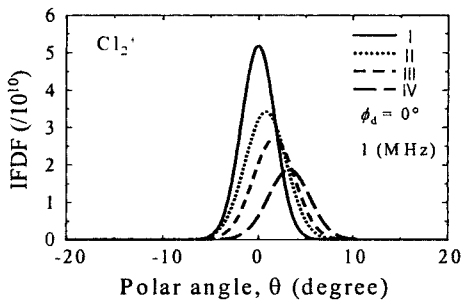

그림 5. 1 MHz, ϕ_d=0°일 때 radial 방향의 비교 점에서의 ion flux distribution function

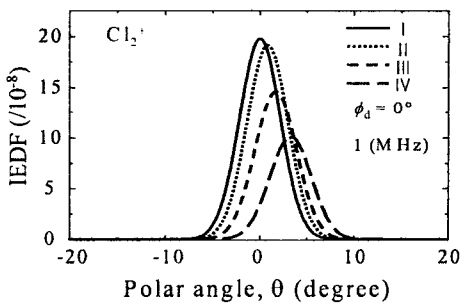

그림 6. 1 MHz, ϕ_d=0°일 때 radial 방향의 비교 점에서의 ion energy distribution function

그림 5, 6은 주파수가 1 MHz인 경우 각 비교 점에서의 밀도, 이온 온도, 이온 유동속도를 조건으로 Cl_2^+이온의 IFDF와 IEDF를 계산한 결과이다. 장치의 wall에 가까울수록 IFDF와 IEDF의 최고값을 갖는 polar angle이 이동하는 것을 알 수 있다.

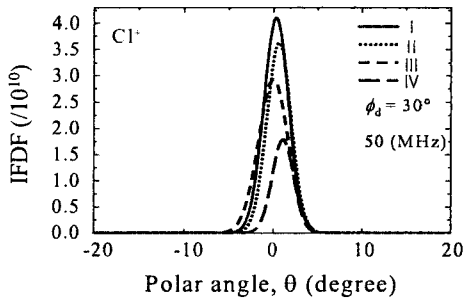

그림 7. 50 MHz, ϕ_d=30°일 때 radial 방향의 비교 점에서의 ion flux distribution function

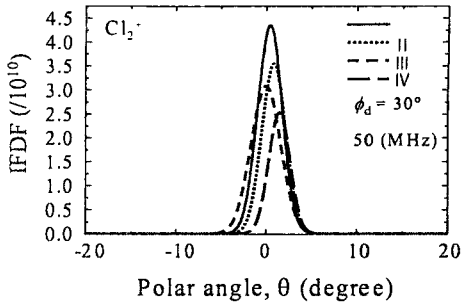

그림 8. 50 MHz, ϕ_d=30°일 때 radial 방향의 비교 점에서의 ion flux distribution function

그림 7, 8은 주파수가 50 MHz인 경우 Cl^+이온과 Cl_2^+이온의 IFDF를 계산한 결과이다. IFDF의 값은 Cl^+이온과 Cl_2^+이온의 질량 차가 2배가 나지만 Cl_2^+이온의 밀도가 Cl^+이온보다 크므로 거의 비슷한 형태로 계산되어진다. 또한 50MHz에서 계산된 결과 값이 1 MHz경우와 마찬가지로 IFDF의 최고 값을 갖는 polar angle이 이동하는 것을 알 수 있다. 위의 결과 값들을 살펴보았을 때 불균일한 플라즈마 밀도와 유동속도가 IFDF와 IEDF의 최고 값을 갖는 polar angle이 이동하는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 고밀도 플라즈마 장치에서 *RF*로 바이어스된 기판에서의 Riley's sheath model과 ion velocity distribution을 결합하여 IEDF와 IFDF를 이용하여, 가정된 불균일한 플라즈마 밀도와 유동속도가 장치의 radial 방향으로 Ar^+, Cl^+, Cl_2^+이온의 IEDF와 IFDF의 최고 값을 갖는 polar angle이 이동하는 현상을 살펴보았다.

본 연구의 차후 진행 과정은 Level set method를 결합하고 식각 시뮬레이션을 완성하고, 플라즈마 수송모델에서 계산된 불균일한 플라즈마 밀도와 유동속도를 가지고 장치의 radial방향으로 식각에 미치는 영향을 연구하는 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 특정 연구개발 과제인 진공기술기반 구축 사업의 지원으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] R. J. Shul and S. J. Pearton, *"Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques"*, 2000

[2] H. F. Winters," *The role of chemisorption in plasma etching*" J. Appl. Phys., 49, 5165, 1978

[3] J. W. Coburn and H. F. Winters,"*Plasma etching?A discussion of mechanisms* "J. Vac. Sci. Technol. 16, 391, 1979

[4] D. C. Gray, I. Tepermeister, and H. H. Sawin," *Phenomenological modeling of ion enhanced surface kinetics in fluorine-based plasma etching*" J. Vac. Sci. Techno. B 11, 1243, 1993

[5] J. P. Chang, F. C. Arnold, G. C. H. zau, H. -S. Shin, and H. H. Swan," *Kinetic study of low energy argon ion-enhanced plasma etching of polysilicon with atomic/molecular chlorine*", J. Vac. Sci. Techno. A 15, 1853, 1977

[6] P. A. Miller and M. E. Riley,"*Dynamics of collisonless rf plasma sheaths*" J. Appl. Phys. 82, 3689, 1997

[7] R. A. Gottscho,"*Ion transport anisotropy in low pressure, high density plasmas*" J. Vac. Sci. Technol. B 11, 1884, 1993

[8] D. H. Yu, D. C. Kwon, J. K. Lee, N. S. Yoon, J. H. Kim, Y. H. Shin, "An effect of ion angular distribution functions for ion drift velocity of radial direction in plasma reactor",대한전기학회 충북지부 춘계학술대회 논문집, 121, 2004

[9] Laxminarayan L. Raja and Mark Linne, *"Analytical model for ion angular distribution functions at rf biased surfaces with collisionless plasma sheaths"*, J. Appl. Phys. 92, 7032, 2002