반도체디스플레이기술학회지 제13권 제3호(2014년 9월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, No. 3. September 2014.

이중 주파수 전원의 용량성 결합 플라즈마 식각장비에서 전극하전에 의한 입사이온 에너지분포 변화연구

최명선 · 장윤창 · 이석환 · 김곤호†
†서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

Electrode Charging Effect on Ion Energy Distribution of Dual-Frequency Driven Capacitively Coupled Plasma Etcher

Myung-Sun Choi, Yunchang Jang, Seok-Hwan Lee and Gon-Ho Kim†
†Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

Abstract

The effect of electrode charging on the ion energy distribution (IED) was investigated in the dual-frequency capacitively coupled plasma source which was powered of 100 MHz RF at the top electrode and 400 kHz bias on the bottom electrode. The charging property was analyzed with the distortion of the measured current and voltage waveforms. The capacitance and the resistance of electrode sheath can change the property of ion and electron charging on the electrode so it is sensitive to the plasma density which is controlled by the main power. The ion energy distribution was estimated by equivalent circuit model, being compared with the measured distribution obtained from the ion energy analyzer. Results show that the low frequency bias power changes effectively the low energy population of ion in the energy distribution.

Key Words : IEDF, Plasma etch, Low frequency bias, dual frequency, Capacitively coupled plasma, electrode charging

1. 서 론

반도체 식각공정 장비에서 폭넓게 사용되고 있는 이중 주파수 용량성 결합 플라즈마(Dual-frequency CCP)는 식각공정 특성의 주요인자인 입사이온속(flux)과 이온입사에너지를 독립적으로 제어가 가능하다는 장점이 있다[1,2]. 이중 주파수 용량성 결합 플라즈마 장치의 입사 이온속의 제어는 플라즈마 가열에 효율적인 고주파 인가전력을 통하여 이루어지고 입사이온에너지의 제어는 고전압 인가가 용이한 저주파 인가전력을 통하여 이루어진다.

Fig. 1과 같이 사인파형의 저주파 전력에 의하여 가속된 이온의 입사에너지분포는 한쌍의 고/저에너지피크를 갖는 분포로 나타난다[3-8]. 이러한 형태의 이온에너지분포는 평균이온에너지($\overline{E}_{ion}$), 고/저에너지피크의 에너지차이(ΔE_{ion}). 그리고 고/전에너지피크 분포비율($n_{ion,Low}/n_{ion}$)의 인자로 그 특성을 표현할 수 있다. 이온의 에너지분포는 인가전압의 파형에 매우 민감하여 평균이온에너지는 인가전압의 DC전위(self-bias)에 비례하고, 고/저에너지피크의 에너지차이는 인가전압의 진폭에 비례함이 알려져 있다. 이온에너지분포의 고/저에너지피크의 분포비율은 인가전압의 파형에 민감하여 인가전압의 파형제어를 통한 입사에너지분포 제어 연구가 이루어지기도 하였다[9,10]. 기존 연구를 통하여 식각 선택비가 고/저에너지피크를 갖는 이온입사에너지분포에 민감한 특성을 가지고 있음이 밝혀졌다. SF_6를 이용한 SiO_2/Si 식각의 선택비는 저에너지 입사이온분포 증가에 따라 악화되고[11], C_xF_y 가스를 이용한 SiO_2 산화막 식각은 저에너지 입사이온에 의하여 선택비 특성이 향상되었다[12]. 따라서 이온입사에너지분포 특성을 좌우하는 저주파 전력의 인가특성에 대한 이해는 제어를 위하여 필수적이다.

본 연구에서는 상부 100 MHz전력과 하부 400 kHz 전력이 인가된 용량성 결합 플라즈마 식각장비에서 운

†E-mail : ghkim@snu.ac.kr

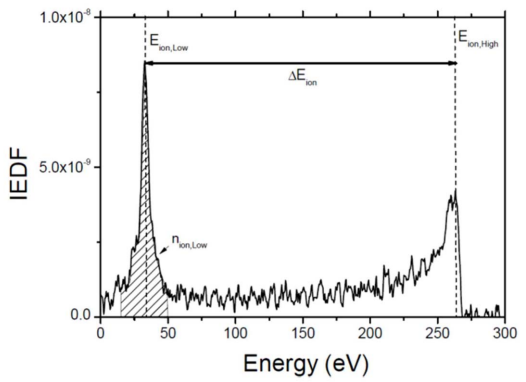

Fig. 1. Ion energy distribution measured by using ion energy analyzer when 200 W of 400 kHz power was applied to the bottom electrode and 500 W of 100 MHz power was applied to the top electrode in 20 mTorr argon atmosphere.

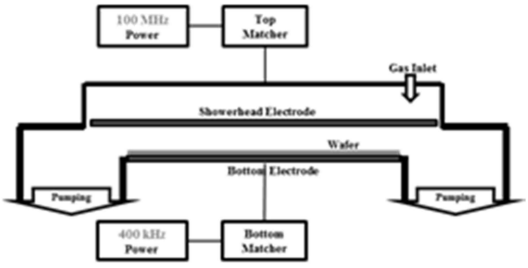

Fig. 2. Schematic of dual-frequency CCP source.

전 인자에 따른 이온에너지 분포의 특성에 미치는 영향을 관찰하였다. 특히 100 MHz 인가전력 및 400 kHz 인가전압에 따라 변화하는 전극의 전자 및 이온 하전 특성을 등가회로의 RC특성시간을 기준으로 해석하여 전극의 하전에 따른 이온입사에너지분포 특성변화를 분석하였다.

2. 실험 장치

Fig. 2는 플라즈마 소스의 개략도이다. 진공챔버는 직경0.6m의 원통형 금속용기이며, 그 상부에 0.4 m직경의 상부 전극이 설치되어있다. 상부전극과 0.02 m간격을 두고 하부전극에 해당하는 0.3 m직경의 정전척(ESC)이 위치한다. 상하부 전극과 용기벽면에 대한 면적비는 A_{top}: A_{bottom}: A_{wall} = 1 : 0.6 : 2.36 으로 3개의 전극을 갖는 모델로 해석을 하였다. 이는 간격이 매우 좁은 전극 구조를 갖는 용량성 결합 플라즈마원이 갖는 특징으로 벽으로 확산되어 손실되는 플라즈마 전류

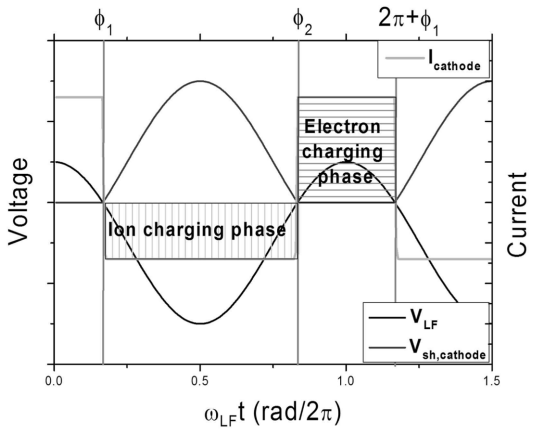

Fig. 3. Schematic diagram of voltage and current at the cathode in the diode switch model.

가 고려되었다[1]. 상부 전극에 100 MHz 전력을 RF정합회로를 통하여 상부전극에 인가하였으며, 400 kHz 전력을 RF정합회로를 통하여 하부전극에 인가하였다.

상하부 전극에 흐르는 전류를 측정하기 위하여 Pearson사의 전류센서(상부 : No.6251, 하부 : No.6250)를 RF정합회로와 전극 사이에 설치하였다. 하부전극에 인가된 전압신호를 측정하기 위하여 RF정합회로와 하부전극 사이에 capacitive divider를 설치하였다. 전류센서 및 capacitive divider에서 측정된 신호는 50Ω 매칭된 오실로스코프(Tektronix DPO7000)를 통하여 계측하였다. 하부전극에는 입사이온에너지 측정계(Impedans사의 Semion)를 설치하여 실제 하부전극에 입사하는 이온에너지분포를 측정하고 다음 절의 모델에서 얻어진 이온에너지 분포 값과 비교하였다.

3. 해석모델

Fig. 3은 사인파형의 전압이 인가된 쉬스의 전위 및 전류 파형을 모사한 그래프이다. 전극의 인가전압이 양의 값을 가지면서 전극에는 전자전류에 의하여 음전위로 하전되며(Fig. 3의 electron chanrging phase), 인가전압이 음의 값을 가지면서 전극에는 이온전류에 의하여 양전위로 하전된다(Fig. 3의 ion charging phase). 이러한 전극의 하전특성은 장치의 전류보전법칙에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{\frac{\phi_2}{\omega}}^{\frac{2\pi+\phi_1}{\omega}} \Gamma_e A_{cathode} dt = \int_{\frac{\phi_2}{\omega}}^{\frac{2\pi+\phi_1}{\omega}} \Gamma_{ion}(A_{anode}+A_{cathode}) dt \qquad (1)$$

여기서 ϕ_1는 인가전압이 증가할 때, V = 0인 위상, ϕ_2는

인가전압이 감소할 때, V = 0인 위상, Γ_{ion}은 입사이온속, Γ_e는 입사전자속, 그리고 $A_{cathode}$와 A_{anode}는 각각 저주파전력이 인가된 전극과 상대전극의 면적을 의미한다. 쉬스에서의 이온가속은 $\phi_1 < \omega t < \phi_2$ 동안에만 이루어지므로 입사이온에너지분포의 낮은 에너지피크의 분포비율은 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{n_{ion,Low}}{n_{ion}} \approx \frac{2\pi + \phi_1 - \phi_2}{2\pi} \tag{2}$$

식 (1)로부터 이 분포비율은 전극 면적비의 함수임을 알 수 있다. 또한 RF인가전극이 RF정합회로의 축전기에 의하여 절연되어있으므로, 전극을 통하여 흐른 전하의 총량은 0이 되어야만 한다.

$$\int_{\frac{\phi_1}{\omega}}^{\frac{2\pi+\phi_1}{\omega}} \Gamma_{ion} A_{cathode} dt - \int_{\frac{\phi_2}{\omega}}^{\frac{2\pi+\phi_1}{\omega}} \Gamma_e A_{cathode} dt = 0 \tag{3}$$

옴에 법칙(Ohm's law)에 의하여 바이어스 낮은 주파수 (LF)에 의한 전압과 전류간의 관계는 다음과 같이 근사적인 관계를 갖는다.

$$\frac{d}{dt} V_{LF} \approx \frac{1}{C_{tot}} I_{LF} \tag{4}$$

여기서 C_{tot}는 등가회로상의 총 정전용량이다. 식(3)의 인가전류 I_{LF}는 쉬스에서 전자 및 이온의 전도전류의 형태와 쉬스 전기장 변화에 따른 변위전류의 형태로 다음과 같은 값으로 흐르게 된다.

$$I_{LF} = I_{sh,dis} + I_{sh,con} \tag{5}$$

따라서 인가전압과 쉬스전압 간의 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} V_{sh} = \frac{I_{sh,dis}}{C_{sh}} = \frac{C_{tot}}{C_{sh}} \frac{d}{dt} V_{LF} - \frac{I_{sh,con}}{C_{sh}} \tag{6}$$

여기서 $I_{sh,dis}$는 쉬스 변위전류, C_{sh}는 쉬스 정전용량, $I_{sh,con}$은 쉬스 전도전류를 의미한다. $I_{sh,con}=V_{sh}/R_{sh}$이므로 인가전압이 사인함수로 주어질 때 식 (6)은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} V_{sh} = \left(\frac{C_{tot}}{C_{sh}} \omega_{LF} - \frac{1}{R_{sh} C_{sh}} \right) V_{LF} \tag{7}$$

여기서 $1/R_{sh}C_{sh}$는 전극의 하전특성을 나타내는 *RC*특성시간이 된다. 공간전하에 대한 Child법칙에 의하여 전극 하전의 RC특성시간은 인가전압과 플라즈마밀도에 대하여 다음과 같은 비례관계를 갖는다.

$$\frac{1}{R_{sh} C_{sh}} \propto n^{-3/2} V_{sh}^{-1/4} \tag{8}$$

4. 실험 결과 및 해석

Fig. 4는 20 mTorr 아르곤 환경에서 상부 전극에 500 W의 100 MHz전력을 인가하고 하부전극에 인가한 400 kHz전력을 200 W까지 변화시킬 때, 이온에너지 측정장치에서 측정된 입사이온에너지분포이다. 측정된 입사이온에너지분포는 400 kHz 인가전력과 관계없이 30eV 근방에서 저에너지피크를 형성하고 400kHz 인가전력에 비례하여 고에너지피크의 에너지가 증가하였다. Fig. 5는 Fig. 4에서 측정된 입사이온에너지분포를 Fig. 1에서 정의된 고/저에너지피크의 에너지차이(ΔE_{ion}). 그리고 고/전 에너지피크 분포비율($n_{ion,Low}/n_{ion}$)로 분석한 값과 식 (2)를 통하여 하부전극의 전압파형으로부터 예상된 값과의 비교그래프이다. 400 kHz 인가전력이 증가함에 따라 ΔE_{ion}는 선형적으로 증가하고 $n_{ion,Low}/n_{ion}$는 반비례하여 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 6은 20 mTorr 아르곤 환경에서 하부전극에 인가한 400 kHz전력을 500 W로 고정하고 상부 전극에 인가한 100 MHz전력을 500 W까지 변화시킬 때의 고/저에너지피크의 에너지차이(ΔE_{ion}). 그리고 고/전에너지피크 분포비율($n_{ion,Low}/n_{ion}$)이다. ΔE_{ion}는 100 MHz 인가전력에 반비례하여 감소하였고 $n_{ion,Low}/n_{ion}$는 100 MHz 인가전력 증가에 따라 0.4에서 0.5로 증가하였다.

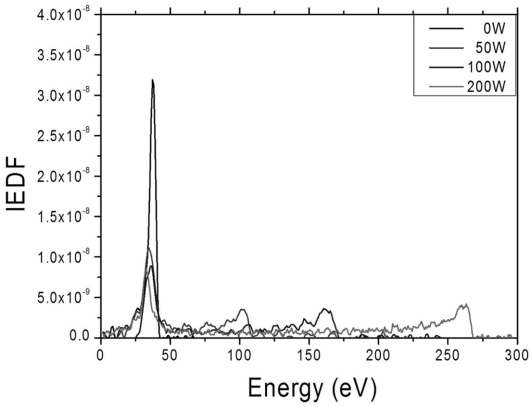

Fig. 4. Ion energy distribution function (IEDF) measured by ion energy analyzer as a function of applied power of 400 kHz measured at 20 mTorr argon atmosphere when 200 W of 100MHz power was applied to the top electrode.

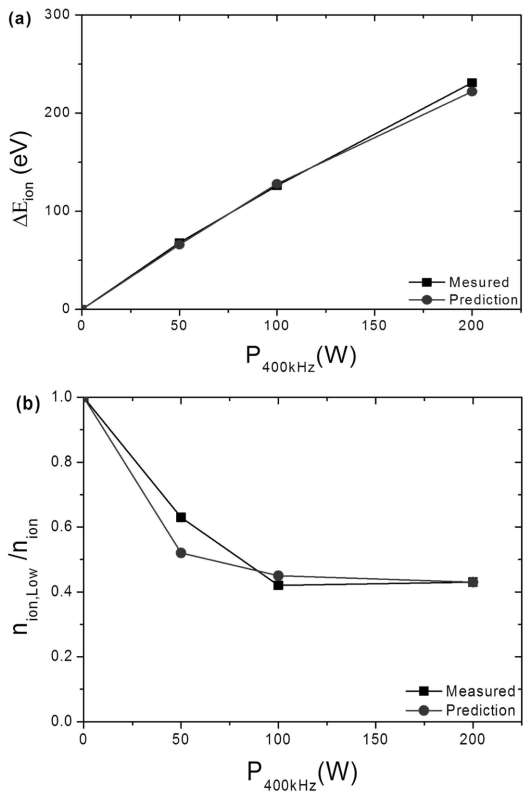

Fig. 5. The characteristics of IEDF as a function of applied 400 kHz power on the bottom electrode when the 200W of 100 MHz power was applied to the top electrode in 20 mTorr of argon atmosphere. (a) is the energy spread of IEDF and (b) is the population ratio of low energy peak of IEDF.

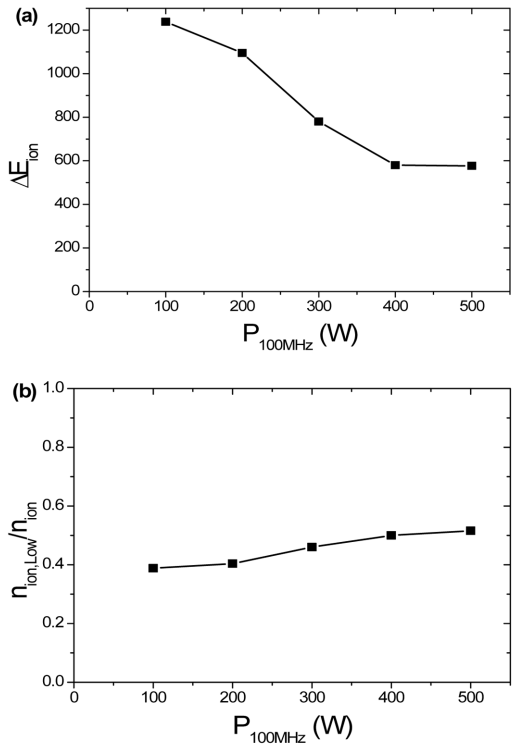

Fig. 6. The characteristics of IEDF predicted by using measured voltage at the bottom electrode as a function of applied 100MHz power on the top electrode when the 500W of 400kHz power was applied to the bottom electrode in 20mTorr of argon atmosphere. (a) is the energy spread of IEDF and (b) is the population ratio of low energy peak of IEDF.

식 (2)의 이온과 전자의 균형식에서 전자가 하전되는 시간은 전극의 입사이온속과 입사전자속의 차이에 의하여 결정된다. 전극의 인가전압을 표현한 식(7)에서 전극의 하전특성시간 $1/R_{sh}C_{sh}$가 인가전압의 변화량 dV_{LF}/dt보다 크거나 비슷한 경우, 전극전압의 변화량 $dVsh/dt$은 전극에 하전량에 따라 감소하게 된다. 식(8)에서 전극의 하전특성시간 $1/R_{sh}C_{sh}$은 $dVsh/dt$감소에 따라 짧아지게 되고 다음과 같이 인가전압과 균형을 이루게 된다.

$$\frac{d}{dt}V_{LF}=\frac{1}{R_{sh}^{*}C_{tot}}<\frac{1}{R_{sh}C_{tot}} \tag{9}$$

이 때, R_{sh}^{*}는 $dVsh/dt$감소에 따라 균형을 이루게 되는 쉬스 저항성분이다. 따라서 쉬스의 전도전류는 플라즈마 밀도에 비례하므로 플라즈마 밀도가 증가할수록 식(7)의 $dVsh/dt$ 이 감소하고 이에 따라 식(2)의 이온가속시간이 감소하여 100 MHz 인가전력이 증가할수록 Fig. 6의 저에너지피크에 분포하는 이온비율 $n_{ion,Low}/n_{ion}$이 증가하였다. 식(7)에서 인가전압의 증가율에 비례하여 인가전압과 균형을 이루는 쉬스 전도전류가 증가하므로 인가전압의 진폭이 증가할수록 쉬스 전도전류에 의한 전극하전이 증가하여 식 (2)의 이온가속시간이 증가하게 된다. 따라서 Fig. 5의 저에너지피크에 분포하는 이온비율은 400 kHz인가전력증가에 따라 감소하였다.

5. 요약 및 결론

플라즈마 식각장비의 특성을 좌우하는 이온입사에너

지분포는 바이어스전극의 하전특성에 영향을 받으므로 이온입사에너지분포의 저에너지피크의 분포비율은 인가전압 대비 전극 하전량이 클수록 감소하는 현상을 기반으로 전력 주파수(HF)와 바이어스 저주파(LF)가 이온에너지 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 저주파 전력의 주파수가 전극 하전시간(RC특성시간)에 비하여 높지 않은 경우, 플라즈마 밀도를 제어하는 고주파 전력은 전극의 하전량을 증가시켜 입사이온에너지분포의 저에너지피크 분포비율을 증가시킨다. 반대로 이온입사에너지를 제어하는 저주파전력은 인가전압을 증가시켜 입사이온에너지의 저에너지피크의 분포비율을 감소시킨다. 따라서 입사이온에너지에 대한 고주파전력의 영향은 저주파전력의 주파수가 전극 하전시간(RC특성시간) 대비 낮아질수록 커지게 되며 플라즈마 장비의 바이어스전력의 주파수는 전극 하전시간을 고려하여 선택하여야 한다. .

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부 전자정보디바이스산업 원천기술개발사업(반도체 공정장비) 및 BK21 플러스 사업에 의하여 일부 지원되었음(No.21A20130012821).

참고문헌

1. H.H. Goto, H.-D. Lowe, T. Ohmi, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.,* Vol.6,pp58-64, 1993.
2. H.C. Kim, *Journal of KSDET*, Vol.4 No.2, pp.11-14, 2005.
3. R. Tsui, *Phys. Rev.,* Vol.168, pp.107-108, 1968.
4. E. Kawamura, V. Vahedi, *Plasma Sources Sci. Technol.,* Vol.8, pp.R45-R64, 1999.
5. R. Farouki, S. Hamaguchi, M. Dalvie, *Phys. Rev. A.,* Vol.45, pp.5913-5929, 1992.
6. P. Benoit-Cattin, *J. Appl. Phys.,* Vol.39, pp.5723, 1968.
7. J.W. Coburn, *J. Appl. Phys.,* Vol.43, pp.4965, 1972.
8. A. Metze, D. Ernie, H. Oskam, *J. Appl. Phys.,* Vol.60, pp.3081-3087, 1986.
9. S.-B. Wang, A. E. Wendt, *J. Appl. Phys.,* Vol.88, pp.643-646, 2000.
10. S. Rauf, *J. Appl. Phys.,* Vol.87, pp.7647-7651, 2000.
11. A. Agarwal, M.J. Kushner, *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.,* Vol.23, pp.1440-1449, 2005.
12. J.S. Han, J.P. McVittie, J. Zheng, *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.,* Vol.13, pp.1893-1899, 1995.

접수일: 2014년 9월 1일, 심사일: 2014년 9월 10일,
게재확정일: 2014년 9월 22일