

정전 탐침을 이용한 유도 결합형 반응기에서 발생하는 산소 플라즈마의 특성연구

김종식 · 김곤호 · 정태훈* · 염근영** · 권광호***

한양대학교-안산 물리학과, *동아대학교 물리학과,
성균관대학교 재료공학과, *한서대학교 전자공학과
(2000년 2월 24일 접수)

Characterization of oxygen plasma by using a langmuir probe in the inductively coupled plasma

Jong-Sik Kim, Gon-Ho Kim, Tae-Hun Chung,*
Geun-Young Yeom,** and Kwang-Ho Kwon***

Department of Physics, Hanyang University-Ansan

*Department of Physics, Dong-A University,

**Department of Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University,

***Department of Electronic Engineering, Hanseo University

(Received February 24, 2000)

요 약 - 정전 탐침을 이용하여 유도 결합형 반응기에서 발생하는 산소 플라즈마의 음이온 발생 특성을 관찰하였다. 입력전력과 운전압력 조건에 따른 산소 플라즈마에서 electronegative 음이온 플라즈마의 입력전력과 운전압력에 따른 정전 탐침에 흐르는 포화 양 전류 대 포화 음 전류(전자 전류와 음 이온 전류의 합)의 전류 비율과 플라즈마 부유 전위와 플라즈마 전위 차의 변화로부터 음이온 발생 특성관찰을 하였다. 전류비의 증가와 전위차 값의 감소는 입력전력이 증가함에 따라 약 30~60 mTorr 운전압력 영역에서 나타났으며 이 조건에서 음이온의 발생 량이 증가함을 의미하고, 플라즈마 내의 이온들은 음이온과 재결합에 의한 손실이 증가하여 플라즈마 밀도가 감소함을 알 수 있었다.

Abstract - Negative ion generation in an inductively coupled oxygen plasma was investigated by using a Langmuir probe. It was observed that the probe current ratio of the positive ion saturation current and the negative current which is consisted of the electron current and the negative ion current, and also the potential difference between the floating potential and plasma potential vary with the RF input power and more sensitively with the operating pressure, respectively. Results show that the operating condition to achieve the maximum probe current ratio and the minimum potential difference shift from the low pressure region to the high pressure regions with increasing the input power. It implies that the generation of the negative oxygen ions increases and the recombination of the positive and negative ions are enhanced in the plasma.

1. 서 론

산소 플라즈마는 건식식각, photo resistor 제거 및 세정, 산화물 박막증착 등의 반도체 제조과정에 널리 이용되고 있다 [1]. 산소 플라즈마의 화학적 특성은 광범위하게 진행되고 있으나 산소 플라즈마의 발생 특성에 관한 실험적인 연구는 매우 미비한 실정이다.

산소 플라즈마에는 세 가지 종류의 하전입자 즉, 이온

화로 인한 이온(electropositive ion)과 전자 및 전자의 흡착으로 생성된 음이온(electronegative ion)이 플라즈마를 형성한다 [2, 3]. 이와 같은 음이온을 포함하는 플라즈마를 일반적으로 electronegative 플라즈마라 부르며 이들 electronegative 플라즈마는 음이온을 포함하지 않는 electropositive 플라즈마와는 다른 특성을 갖는다고 알려져 있다 [2, 3]. Kouznetsov 등은 electronegative 플라즈마에서 형성되는 음이온들은 이온 및 전자와 함께 대부

분 플라즈마의 중앙에 분포하며, 그 바깥 가장자리에는 이온과 전자로 구성된 경계 층과 이온들이 대부분인 플라즈마 덩개(sheath)로 구성된 분포 특성을 갖는다고 예상하고 있다. 따라서 electronegative 플라즈마의 경우 반응기 중앙부에는 플라즈마 내의 이온으로 구성된 양 전하, 전자와 음이온으로 구성된 음전하로써 준 중성 상태를 유지하게 된다. 또한 electronegative 플라즈마에서 발생하는 음이온의 양은 높은 운전압력과 낮은 입력 전력에서 많이 발생한다고 예상하고 있다 [2, 3].

음이온의 발생은 반도체 제조 공정 시 반도체 기판 (wafer) 등의 처리 시편 앞에 형성되는 플라즈마 덩개 (sheath) 전위의 감소를 가져와 [2, 3] 시편으로 입사되는 이온의 에너지를 변화시킴으로써 공정 조건의 변화를 초래하게 된다. 따라서 산소 플라즈마를 이용한 플라즈마 ashing, 산화물 박막증착 등의 반도체 공정 중에 기판의 전압 조절은 기판 인가전압 뿐 만 아니라 입력전력과 운전압력에 따른 플라즈마 공간 내에 형성되는 산소 음이온의 생성 특성 변화에 대한 정보가 필수적이다.

본 연구에서는 탐침 특성 곡선에서 음이온의 발생이 증가하면서 탐침의 포화 음이온 전류의 크기는 감소하게 되며 아울러 부유 전위도 감소하게 되는 특성을 이용하여(2절 참조). RF oscillation이 존재하는 유도결합형 산소 플라즈마에서 RF oscillation을 보상할 수 있는 RF 보상 탐침으로부터 [4, 5] 얻은 전류-전압 자료로부터 양 전류 대 음 전류의 전류비 변화와 플라즈마의 부유와 플라즈마 전위와 차의 변화를 관찰함으로써 산소 음이온 플라즈마의 발생 특성을 입력전력과 운전압력에 관하여 정성적으로 관찰하였다. 또한 얻어진 산소 음이온의 특성을 Chung등이 제안한 global 모델 [6, 7]과 비교하여 발생된 음이온의 거동을 관찰하였다.

2. 탐침 이론

2.1 전류비

Electronegative 플라즈마에서 RF 가 보상된 정전 탐침에 흐르는 포화 이온 전류, 포화 전자 전류 및 포화 음이온 전류는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다 [8, 9].

포화 이온 전류는

$$I_+^* \approx 0.6n_+Se\sqrt{\frac{T_e}{m_+}} \quad (1)$$

포화 전자 전류는

$$I_e^* \approx n_eSe\sqrt{\frac{T_e}{2\pi m_e}} \quad (2)$$

포화 음이온 전류는

$$I_-^* \approx n_-Se\sqrt{\frac{T_-}{2\pi m_-}} \quad (3)$$

여기서 n_+ 와 n_e 는 각각 중앙 플라즈마의 이온 밀도와 전자 밀도이며, S 는 탐침의 면적, e 는 전자의 전하량, T_e 는 전자 온도, T_- 는 음이온 온도, m_+ 와 m_e 는 각각 이온 질량과 전자 질량을 나타내며 m_- 는 음이온의 질량을 나타낸다.

음이온이 존재하는 electronegative 플라즈마에서 유지되는 준 중성 상태는 $n_+ \approx n_e + n_-$ 의 조건이 성립한다 [8, 9]. 따라서 포화 음 전류는 포화 전자 전류와 포화 음이온 전류의 합으로 구성되므로 식 (1), (2)와 (3)을 이용하여 양 전류 대 음 전류의 비율인 전류 비를 구하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{I_+^*}{I_e^* + I_-^*} \approx \frac{1.5n_+}{240n_e + 0.2n_-} \propto \frac{n_+}{n_e} \quad (4)$$

여기서 μ 는 수소원자 질량으로 규격화시킨 이온 질량 비(m_i/m_H)이고 m_H 는 수소원자 질량이다. 온도는 $T_- \approx T_+ \approx T_e/10$ [9], 이온은 산소 분자 O_2^+ ($\mu = 32$), 음이온은 산소 원자 O^- ($\mu = 16$)가 다른 입자들에 비해 지배적으로 발생한다고 가정하여 $2m_- \approx m_i$ 조건을 만족한다 [10].

Electronegative 플라즈마의 준 중성 상태 조건과 전류 비 식 (4)를 이용하여 이온과 음이온의 밀도 비로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{n_-}{n_+} \approx \frac{\left[0.6\sqrt{2\pi} - \sqrt{\frac{m_+}{m_e}}\alpha\right]}{\left[\sqrt{\frac{T_+}{T_e}} - \sqrt{\frac{m_+}{m_e}}\right]\alpha} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 음이온 밀도의 정량적인 값을 구할 수 있을 것이나 음이온의 온도, RF에 의한 플라즈마 공간 전위에서의 전류 비 측정 오차 등으로 인하여 식 (5)로부터 신뢰도 있는 음이온의 양의 측정에는 좀 더 많은 연구가 요구되며 본 연구에서는 식 (4)의 전류비를 이용하여 음이온의 입력전력과 입력압력에 대한 발생 특성을 정성적으로 관찰하였다.

2.2. 전위차

RF가 보상된 탐침 특성 곡선으로부터 음이온이 존재하는 electronegative 플라즈마에서의 플라즈마 공간 전위와 부유 전위와의 관계는 다음과 같다.

$$n_e \sqrt{\frac{T_e}{2\pi m_e}} \exp\left[\frac{-e(V_p - V_f)}{T_e}\right] + n_- \sqrt{\frac{T_+}{2\pi m_-}} \exp\left[\frac{-e(V_p - V_f)}{T_+}\right] \approx 0.6 n_+ \sqrt{\frac{T_e}{m_+}} \quad (6)$$

여기서 V_p 는 플라즈마 공간 전위이며 V_B 는 탐침에 인가되는 전압이다 [11]. 음이온이 존재하는 electronegative 플라즈마에서 준 중성 상태 조건과 식 (6)을 이용하여 이온과 음이온의 밀도 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{n_-}{n_+} \approx \frac{0.6\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{m_e}{m_+}} \times \exp\left[\frac{-e(V_p - V_f)}{T_e}\right] \times \left[0.6\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{m_e}{m_+}}\right]^2}{0.6\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{m_e}{m_+}} \times \exp\left[\frac{-e(V_p - V_f)}{T_e}\right]} \quad (7)$$

이온 및 음이온의 온도와 RF 플라즈마에서의 플라즈마 공간 전위가 명확히 측정되면 식 (7)을 이용하여 음이온 밀도의 정량적인 값을 구할 수 있을 것이나 RF에 의한 플라즈마 공간 전위, 부유 전위에서의 전위차 측정 오차 등으로 인하여 식 (7)로부터 정량적인 음이온의 양의 측정에는 많은 어려움이 있어 보다 깊은 연구가 필요하다. 본 연구에서 전류비의 경우와 같이 입력 전력과 압력의 변화에 따른 전위차 변화를 관찰함으로써 정성적인 음이온 발생 특성을 관찰하였다.

2.3. 산소 플라즈마의 Global 모델

Global 모델에서 사용된 가정은 다음과 같다 [6, 7, 12]. (a) 플라즈마 내의 밀도는 평균밀도를 사용한다. (b) Electronegative 플라즈마에서 음이온 밀도는 포물선 형태로 분포하며 플라즈마 덩개 가장자리에서 존재하지 않고, 전자 밀도는 플라즈마 덩개 가장자리를 제외하고 균일하게 분포하며 이온 밀도는 전자와 음이온 밀도의 합으로 분포한다. (c) 음이온은 한가지 종류(O^-)만 존재한다. (d) 전자는 Maxwellian 분포를 가진다. (e) 이온-중성입자의 평균 자유행로는 모든 종에서 동일하다.

위의 가정들을 이용하여 다음의 식들을 정의할 수 있다 [6, 7, 12]. 산소 플라즈마 내의 입자의 Particle

balance, 즉 이온화에 의해 발생하는 이온의 밀도는 O_2^+ 입자가 확산에 의해 벽으로 손실되는 양과 O_2^+ 와 O^- 가 재결합하면서 손실되는 양의 합과 같다.

$$K_{iz} n_{O_2} n_e - O_{2Loss}^+ n_{O_2^+} - K_{rec} n_{O_2^+} n_{O^-} = 0 \quad (8)$$

여기서 K_{iz} 는 이온화 비율 상수, n_{O_2} 는 중성입자 밀도, n_e 는 전자 밀도, O_{2Loss}^+ 는 이온이 확산에 의해 벽으로 손실되는 비율, $n_{O_2^+}$ 는 이온 밀도, K_{rec} 는 재결합 비율 상수, n_{O^-} 는 음이온 밀도이다.

또한 음이온의 경우 Particle balance는 음이온이 재결합하면서 손실되는 양과 전자가 중성입자에 흡착되면서 생성되는 음이온의 양이 같다.

$$K_{rec} n_{O_2^+} n_{O^-} - K_{att} n_e n_{O_2} = 0 \quad (9)$$

여기서 K_{att} 는 흡착 비율 상수이다.

Power balance의 경우 반응기 내에서 발생하는 전자-중성입자의 충돌에 의해 손실되는 입력전력과 확산에 의해 벽에서 손실되는 이온과 전자의 에너지 합과 균형을 이룰 것이므로 다음과 같은 관계식을 정의할 수 있다.

$$P_{abs} \approx V \epsilon_L K_{iz} n_{O_2} n_e - V O_{2Loss}^+ (\epsilon_e + \epsilon_i) n_{O_2^+} \quad (10)$$

여기서, P_{abs} 는 플라즈마에 흡수되는 입력전력, V 는 반응기 부피, $\epsilon_L (= \epsilon_{c2} + \epsilon_e + \epsilon_i)$ 은 전체 에너지 손실, ϵ_{c2} 는 전체 충돌 전자 에너지 대 이온화, ϵ_e 와 ϵ_i 는 손실되는 전자와 이온 에너지이다.

식 (8), (9), (10)을 정리하게 되면 Ion-flux-loss dominant 영역에서의 이온, 전자 및 음이온 밀도는 각각 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$n_{O_2^+} \propto \frac{d_{eff} P_{abs}}{u_{BO_2^+} \epsilon_L V} \quad (11)$$

$$n_e \propto \frac{P_{abs}}{p V \epsilon_L K_{iz}} \quad (12)$$

$$n_{O^-} \approx \frac{R_L u_{BO_2^+} n_e}{K_{rec} d_{eff} n_{O_2^+}} \propto \frac{u_{BO_2^+}}{d_{eff} K_{iz}} \quad (13)$$

여기서 $u_{BO_2^+}$ 는 이온의 Bohm 속도 식 (본 논문에서는 음이온이 존재하는 경우에도 쉬스로 입사하는 이온의 에너지는 Bohm조건을 만족하나가 가정하였으나 이 부분에 대한 보다 상세한 연구가 필요할 것이다), R_L 은 재결합에 의한 손실과 이온이 확산에 의해 벽으로 손실되는 양의 비율, $d_{eff} \left(= \frac{1}{2} \frac{R_L}{R_L + L_h} \right)$ 는 유

효 반응기 길이이다. 또한 R 은 반응기의 반경, L 은 반응기의 길이, h_L 과 h_R 은 각각 반응용기 축과 반경의 플라즈마 덮개에서의 밀도를 중앙 플라즈마 밀도로 규격화시킨 값이므로 운전압력이 증가하게 되면 중성입자 밀도가 증가하여 감소하게 된다 [6, 7, 12].

Chung 등의 모델 [6, 7]에 따르면 높은 운전압력과 낮은 입력전력에서는 산소 분자의 상대적인 전자 흡착율이 증가하여 음이온의 발생이 증가하며, 낮은 운전압력에서는 산소 분자의 해리-흡착반응이 감소하여 음이온의 생성율이 감소하고 따라서 음이온 밀도는 감소하게 된다. 또한 공간 내에서 이온이 확산에 의해 벽으로 손실되는 양이 공간 내에서 재결합되는 양보다 적어지는 경우 음이온 밀도는 증가하게 된다. 일정 운전압력이상이 되면 입자간의 충돌이 증가하기 시작하면서 이온과 음이온 사이의 재결합이 증가하기 시작하여 일정 운전압력 이후에는 이온과 음이온 밀도가 감소하게 된다. 따라서 음이온 플라즈마 내에서 이온의 손실은 압력 범위에 따라서 다음과 같은 두 가지 영역으로 구분된다. 낮은 운전압력 영역에서 입자들이 확산에 의해 벽으로 손실되는 양이 많은 영역을 Ion-flux-loss dominant 영역이라 하고 반면에 중간 또는 높은 운전압력 영역에서 공간 내 입자들의 재결합에 의해 손실되는 양이 많은 영역을 Recombination-loss dominant 영역이라고 한다 [6].

Ion-flux-loss dominant 영역에서 운전압력이 증가하게 되면 전자와 입자들 사이의 충돌이 증가하면서 전자의 에너지 손실이 증가하여 전자 온도는 감소하게 된다

(그림 1참조) [12]. 그림 1은 Maxwellian 분포를 가지는 플라즈마에서 전자 온도와 $n_g d_{eff}$ 의 관계를 나타낸다. 그림에서 x 축은 $n_g d_{eff}$ 이며 y 축은 전자 온도이다. x 축에서 n_g 는 중성입자의 밀도, 즉 운전압력과 비례하는 값이며 d_{eff} 는 유효 반응기 길이이며 이 값도 운전압력에 비례하는 값이다. 따라서 운전압력이 증가함에 따라서 $n_g d_{eff}$ 가 증가하며 그림 1에서와 같이 전자 온도는 감소하는 경향이 나타난다. 전자 온도가 감소함에 따라서 이온의 Bohm 속도 u_{Bohm} 와 이온화율 K_{iz} 가 감소한다. 그러나 운전압력이 증가하게 되면 플라즈마 내 입자들 사이의 충돌이 증가하여 입자의 에너지 손실이 증가하므로 입자가 가지는 전체 에너지 손실 ϵ_L 은 증가하게 된다. 또한 이온과 중성입자의 평균 충돌 자유행로 λ_i 에 비례하는 반응용기 축과 반경의 플라즈마 덮개에서의 밀도를 중앙 플라즈마 밀도로 규격화시킨 h_L 과 h_R 값은 운전압력이 증가함에 따라서 감소하게 된다. 따라서 Ion-flux loss dominant 영역에서 운전압력이 증가하게 되면 이온과 전자 밀도는 식 (11) 및 (12)에서와 같이 증가한다. 나아가 이 영역에서 공간 내 이온이 확산에 의해 벽으로 손실되는 이온의 양이 증가하게 되어 플라즈마의 중앙에는 전자 밀도가 증가하고 이 전자가 중성입자들과 흡착이 활발해 지면서 음이온의 양이 증가하게 된다. 그러나 특정 운전압력 이후에는 증가한 음이온과 이온이 재결합 양이 증가하므로 이온과 음이온 밀도의 크기는 감소하게 되는 Recombination loss dominant 영역으로 변화한다.

3. 실험 장치

본 연구에서 사용된 반응용기는 stainless steel(SUS 304)로 제작되었고 내경 500 ϕ , 길이 600 mm의 크기를 갖는 원통형 형태이다. 그림 2에서와 같이 외경 580 ϕ 의 port에 500 ϕ , 24 t 강화유리를 설치하고 반응기 외부에 안테나를 부착하였다. 본 실험에서 좌측의 500 ϕ window에 설치된 안테나는 가로 300 \times 세로 400 mm 직사각형 모양으로 3회 감긴 안테나를 사용하였으며 사용된 안테나의 인덕턴스는 3.4 μ H로 측정되었다. 안테나의 재질은 무산소동이며 가로, 세로 각 10.0 mm 내부에 5 ϕ 의 냉각수용 hole로 구성되어 있어 RF 전력을 인가 중에는 냉각수를 흘려서 안테나를 냉각하여 안테나와 면 접촉한 강화유리에 열로 인한 스트레스를 받지 않도록 하였다. Matching network을 이용하여

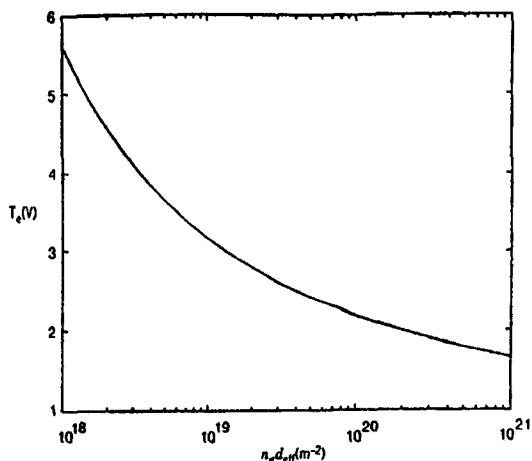


그림 1. Maxwellian 분포를 가지는 플라즈마에서 전자온도와 가스 압력과의 관계 [12].

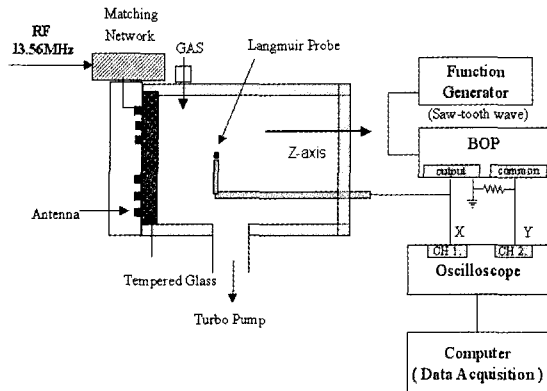


그림 2. ICP 반응기 및 자료 취득계 구성도.

안테나에 13.56 MHz의 RF 전력을 인가하였다. 반응 용기 내의 산소 운전압력은 100 sccm 용량의 MFC (Mass Flow Controller)를 이용하여 조절하였고, 300 l/s 용량의 터보 펌프에 의해 10^{-6} Torr의 기초 진공도를 유지하였다. 입력전력, 200-400 W에서 산소의 운전 압력을 1.0-100 mTorr 까지 변화시켜 가면서 산소 플라즈마를 발생시켰다.

본 연구에서는 RF oscillation이 보상된 RF 보상 탐침을 이용하여 산소 플라즈마의 음이온 발생 특성을 연구하였다. 일반적인 유도 결합형 플라즈마에서의 경우 안테나 정전기장에 의한 축전 용량성 결합(E mode)에 의해 플라즈마의 공간 전위가 RF에 따라 요동하고 있다. 이런 환경에서 일반적인 탐침에 의해서 얻어지는 플라즈마 전위는 시간에 따른 플라즈마 공간 전위의 변동의 평균값을 측정하게 되어 플라즈마 공간 전위의 설정이 매우 어렵게 되며 음 전류와 양 전류의 크기가 같은 탐침의 전위인 부유 전위 값은 요동의 크기에 따라 낮은 값을 갖게 된다. 따라서 보다 정확한 전위와 포화 전류를 측정하기 위해서는 RF 플라즈마에서 얻어지는 탐침 자료에서 RF oscillation을 보상하여 플라즈마 전류 값을 추출할 수 있는 RF 보상 탐침 방법을 사용한다 [4, 5].

RF 보상 탐침 법에는 일반적으로 한 개 또는 여러 개의 notch filter를 사용하여 RF oscillation이 제거된 전류-전압 자료를 얻는다. RF 보상 탐침에서 사용되는 notch filter는 특정 주파수에 대해 최대의 임피던스를 갖도록 만들어진 LC가 병렬로 연결된 공진 회로로서 특정 주파수, 즉 입력 전력의 주파수에서 탐침의 임피던스가 최대가 되도록 하여 그 주파수에 해당되는 신호를

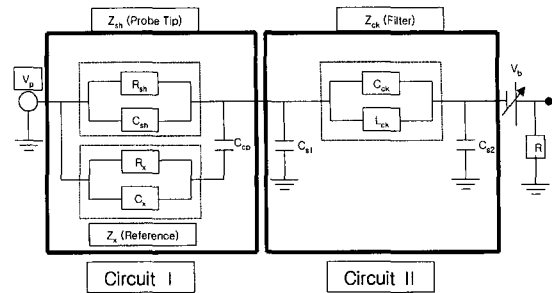


그림 3. RF 보상 탐침이 플라즈마 내에 삽입되어 있을 경우의 탐침 등가 회로.

제어하도록 만들어져 있다. 그림 3은 RF oscillation이 존재하는 플라즈마에 RF 보상 탐침이 삽입되어 있을 때의 등가 회로도이다 [4, 5]. 그림 3에서 회로 1은 탐침 부분의 소자들에 의해 형성되는 등가회로이고 회로 2는 notch filter 등의 소자들에 의해 형성되는 등가회로를 나타낸다. 여기서 V_p 는 RF oscillation을 받는 플라즈마의 전위, Z_{sh} 는 탐침과 플라즈마가 만들어 내는 플라즈마 덮개의 임피던스, R_{sh} 는 탐침과 플라즈마 덮개가 만드는 저항, C_{sh} 는 탐침과 플라즈마 덮개가 만드는 축전지, R_x 는 reference 탐침과 플라즈마가 만드는 저항, C_x 는 reference 탐침과 플라즈마가 만드는 축전지, C_{cp} 는 blocking 축전기, Z_{ck} 는 notch filter의 임피던스, C_{ck} 는 notch filter의 축전기, L_{ck} 는 notch filter의 인덕터, C_{s1} 은 탐침과 filter 사이의 stray 축전기, C_{s2} 는 notch filter와 bias 전압이 연결되는 사이의 stray 축전지, V_b 는 탐침에 인가하는 전압, R은 탐침에 흐르는 전류 측정을 위한 저항이다.

RF oscillation이 있는 플라즈마에 RF 보상 탐침이 삽입되어 있는 경우 탐침에 인가되는 전압은

$$V_{probe} \approx V_p \frac{Z_{ck}(\omega)}{Z_{ck}(\omega) + Z_{sh}} \quad (14)$$

로 주어진다. 여기서 V_{probe} 는 탐침에서 측정되는 전압이다.

식 (14)에서 V_{probe} 와 V_p 의 전압이 같기 위해서는 Z_{sh} 를 무시 할 수 있을 만큼의 높은 임피던스 $Z_{ck}(\omega)$ 가 필요하고, $Z_{ck}(\omega)$ 는 notch filter에 의해 결정되어지며 이것은 플라즈마 발생에 사용되는 주파수를 제거하는 LC 병렬회로로 구성된 notch filter의 임피던스 값이다. 즉, 식 (14)에서 V_{probe} 와 V_p 가 같은 전압이 되기 위해서는 회로 2의 임피던스가 회로 1의 임피던스

보다 커야한다.

본 연구에서 사용된 RF 보상 탐침은 탐침, reference 탐침, 13.56 MHz의 1, 2, 3차 조화 주파수인 13.56, 27, 40 MHz를 제거하기 위한 notch filter로 구성되어 있다. Reference 탐침은 RF oscillation이 있는 플라즈마에 삽입되어 있는 탐침에서 이때 얻어지는 전압-전류 자료가 RF oscillation에 영향을 받음으로 이 RF oscillation이 자료취득에 미치는 영향을 최소화시키기 위하여 RF oscillation을 보상하는 역할을 한다. Reference 탐침과 연결되어 있는 Blocking 축전기 C_p 는 reference 탐침에서 얻어지는 직류성분을 제거하고 교류성분을 사용하기 위하여 사용되었다. Notch filter는 탐침에서 취득되는 전류-전압 자료에 포함되어 있는 13.56 MHz의 1, 2, 3차 조화 주파수까지를 제거하도록 해당 주파수에 맞도록 꾸며진 3개의 notch filter를 사용하였다.

RF 보상 탐침이 제거하고자 하는 주파수 대역에서 최대의 임피던스 값을 갖도록 하기 위하여 HP 8510C 네트워크 분석기를 이용하여 RF 주파수 13.56 MHz의 조화 주파수에 따른 RF 보상탐침 전체의 임피던스를 측정하여 보정하였다. RF 보상 탐침의 tip, reference 탐침, blocking 축전기 등의 소자에 의해 임피던스가 바뀌므로 RF 보상 탐침의 전체 임피던스에 영향을 주기 때문에 RF 보상 탐침 전체의 임피던스를 측정하여 filter 내의 LC 값을 보정하였다.

본 연구에서 사용된 RF 보상 탐침은 반응용기 우측 port를 통해 삽입된 정전 탐침을 이용하여 측정하였으며 원판 Ta (6.2 ϕ)로 탐침 단면만을 사용하는 단면 탐침을 사용하였다. 진단 장비는 탐침 본체와 탐침에 인가되는 전압 및 탐침으로부터 얻어지는 플라즈마 전류의 변화를 제어하고 측정할 수 있는 자료 취득계(Data Acquisition System; DAS)로 구성되어 있으며 1개의 전류-전압 자료 세트에 1000개의 자료 값을 얻었다.

자료 취득계는 그림 2에서와 같이 구성되어 있다. 주파수 발생기(Wavetek, model 395)를 이용하여 튜니파를 BOP(Bipolar Operation Power Supply; Kepco, 200-1M)에 인가하면 BOP에서 인가전압을 20배로 증폭하여 정전 탐침에 인가하게 되고, 이 때 인가전압에 따라 플라즈마 내에 있는 탐침으로는 이온과 전자 전류가 포집되며 인가전압과 이에 따라 측정되는 전류 값을 각각 오실로스코프(Tektronix, TDS 360)와 연결된 PC를 이용하여 X, Y로 출력하여 플라즈마의 전류-전압

자료를 얻을 수 있었다. 탐침의 위치는 반응용기 중심 축으로 안테나에서 20 cm 떨어진 부분에서 중심 플라즈마의 특성을 관찰하였으며 각 조건에서 얻어진 자료는 3회 이상 측정하여 평균값을 이용하여 분석에 활용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 입력전력과 운전압력에 따른 산소 플라즈마의 전자 온도 분포를 나타낸다. 전자 온도는 운전압력이 증가함에 따라서 약 2.5 eV에서 약 1.5 eV로 감소하는 경향이 보였다. 그림 1에서 나타난 것처럼 운전압력이 증가함에 따라서 $n_e d_{eff}$ 가 증가하고 전자 온도는 감소하는 경향과 대체로 일치함을 보여준다. 또한 연구 결과를 분석하기 위한 global 모델에서 음이온 밀도 및 이온화율 K_{iz} 계산은 실험에서 측정된 전자온도를 이용하였다.

음이온의 발생이 정전 탐침의 전압-전류 특성 곡선 변화에 미치는 연구를 수행하기 위하여 질소 플라즈마와 산소 플라즈마에서의 탐침 곡선의 특성 변화를 관찰하였다. 그림 5에서는 입력전력과 운전압력에 따른 산소와 질소 플라즈마에서 측정된 전류 비의 값을 실선과 점선으로 각각 나타내었다. 전류 비는 정전 탐침에 흐르는 포화 양 전류와 포화 음 전류의 비율 근사적으로 식 (4)로 표현되며 그림 5에서 점선으로 나타낸 electropositive한 질소 플라즈마의 경우 운전압력 변화에 따른 전류 비의 분포는 질소 이온과 전자 질량 비의 제곱근 값에 해당하는 약 0.02의 균일한 값을 보이는 반면 실선으로 나타낸 산소 플라즈마의 경우는 압력에 따라 크게

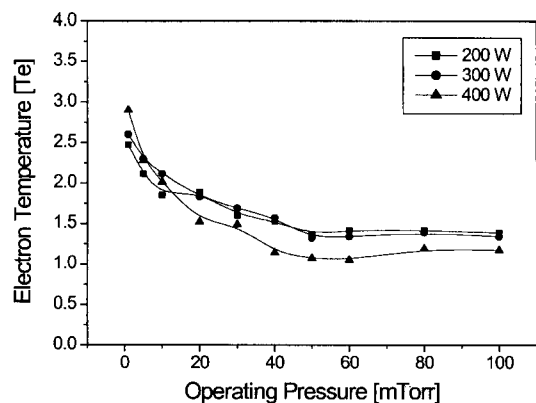


그림 4. 입력전력과 운전압력에 따른 전자온도 분포.

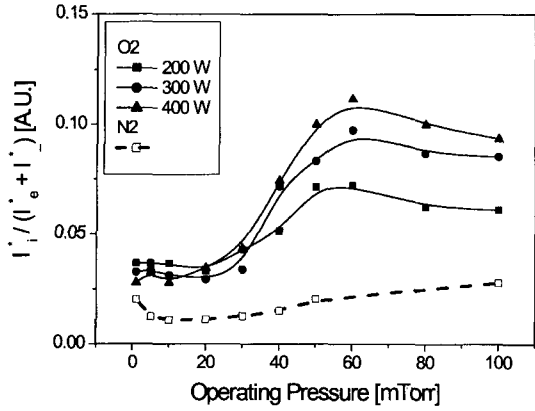


그림 5. 입력전력과 운전압력에 따른 산소(실선)와 질소(점선) 플라즈마에서의 전류 비 분포.

변화하며 운전 압력이 증가할수록 약 5배의 이상의 변화를 보였다. 이 결과는 식 (4)에서 예상한 바와 같이 음이온의 발생에 따라 전류비가 변한 것으로 사려된다. 또한 산소 플라즈마에서 얻은 전류 비는 약 50-60 mTorr 영역에서 최대 값을 갖고 감소하였으며 입력전력이 증가할수록 최대 전류 비를 갖는 운전 압력 조건이 증가함을 보여주고 있다.

그림 6은 입력전력과 운전압력에 따른 산소와 질소 플라즈마에서 측정된 전위 차를 전자 온도로 규격화한 $e(V_p - V_f)/T_e$ 의 분포이다. 그림에서 산소 플라즈마(실선)의 경우 약 30 mTorr 이하에서 전위 차의 급격한 감소를 보였고 약 60 mTorr에서 최소 값을 갖었다. 이는 2.3 절에서 예상한 바와 같이 음이온 밀도의 증가에 의한 영향으로 사려된다. 그러나 산소 플라즈마의 경우와

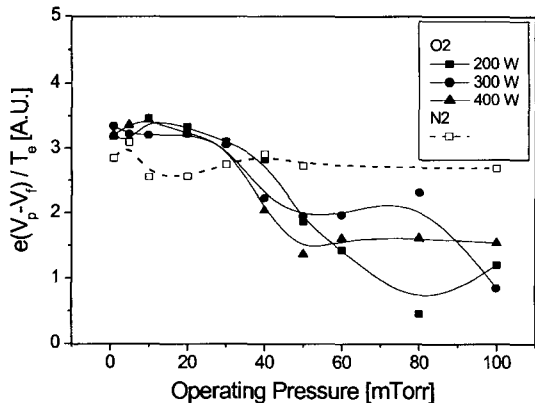


그림 6. 입력전력과 운전압력에 따른 산소(실선)와 질소(점선) 플라즈마에서의 전위 차, $e(V_p - V_f)/T_e$ 의 분포.

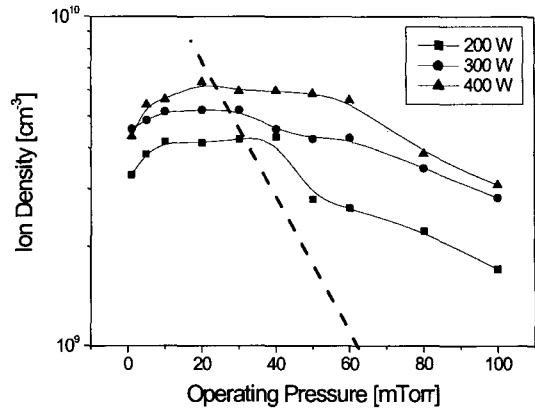


그림 7. 입력전력과 운전압력에 따른 이온 밀도 분포.

는 달리 점선으로 나타낸 electropositive한 질소 플라즈마의 결과는 운전압력 변화에 큰 변화를 보이지 않았다. 따라서 음이온의 발생으로 인한 부유 전위의 감소를 예상할 수 있으며 그림 5와 6의 결과로부터 탐침에 의한 산소 음이온 플라즈마의 발생 특성 변화 관찰이 가능함을 알 수 있었다.

그림 7은 입력전력과 운전압력에 따른 산소 플라즈마의 이온 밀도 분포를 보여준다. 그림에서와 같이 이온 밀도는 운전압력이 20-40 mTorr 이후에 감소하였으며 그림에서 점선으로 나타낸 바와 같이 입력전력이 증가함에 따라 최대 이온 밀도 형성 조건은 운전압력이 낮은 영역에서 형성되는 경향을 보였다. 이러한 현상은 특정 운전압력을 기준으로 공간 내에 형성된 이온 밀도 분포가 변화하였음을 의미하며 높은 운전압력에서 음이

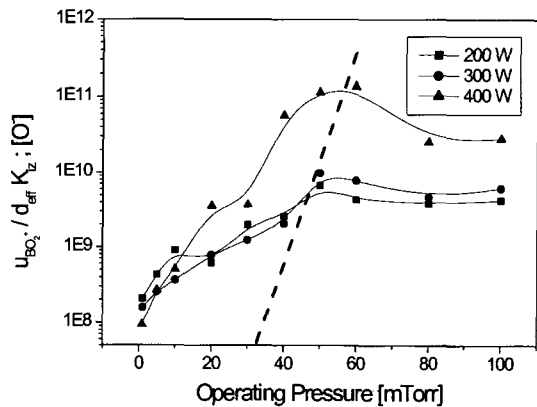


그림 8. 입력전력과 운전압력에 따른 식 (13)을 이용하여 이론적으로 계산된 음이온 밀도 분포 (Chung의 Global 모델 참조 [6, 7]).

온의 양이 증가함에 따라 음이온과 이온의 재결합에 의한 손실이 증가하였음을 의미한다.

그림 8은 입력전력과 운전압력 등의 실험 조건에서 음이온 산소 플라즈마의 발생 분포를 Chung의 global 모델에서 식 (13)을 이용하여 계산한 결과이다. 이때 운전압력이 증가하면서 음이온 밀도도 증가하다가 약 50-60 mTorr에서 최대 음이온 밀도 값을 갖고 그 이후에는 감소하는 경향을 보였다. 그림에서 점선으로 나타낸 바와 같이 입력전력이 증가함에 따라 최대 음이온 밀도 생성 조건은 운전압력이 높은 영역에서 형성되는 경향을 보였다. 음이온의 발생량이 비교적 적은 낮은 운전압력에서는 공간내의 플라즈마 이온의 대부분은 확산에 의해 벽으로 손실되어 2.3절에서 논의한 Ion-flux loss dominant 영역의 특성을 보여주고 있다. 또한 운전압력이 증가하여 음이온의 발생량이 늘어남에 따라서 공간 내에서의 음이온과 이온의 재결합에 의한 이온의 손실이 증가되어 Recombination loss dominant 영역의 특성을 보여주고 이때 결과적으로 공간 내의 이온의 밀도는 감소하게 된다. 따라서 그림 5에서의 전류비 값의 최대 점과 그림 6에서의 전위차 변화가 가장 큰 최대 지점은 이온이 확산에 의해 벽으로 손실되는 양이 많은 영역(Ion-Flux loss dominant region)에서 재결합에 의한 손실이 많은 영역(Recombination loss dominant region)으로 플라즈마의 특성이 변화하는 경계 운전 압력 조건을 의미하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 유도결합형 반응기에서 발생하는 산소 플라즈마에서 정전 탐침으로 측정된 자료로부터 얻어진 전류비와 전위차를 이용하여 운전압력에 따른 음이온 발생 경향을 관찰하였다. 산소 플라즈마에서 측정된 전류비, $\alpha = I_e^*/(I_e^* + I^*)$ 는 정전 탐침에 흐르는 포화 양 전류와 포화 음 전류의 비율이고 운전압력에 따라서 크게 변화하며 운전압력이 증가할수록 전류비는 증가하여 약 60 mTorr일 때 최소 값에서 최대 값으로 약 5배의 증가로 최고점을 갖은 영역을 형성한 후 감소하는 경향을 보이며 이는 음이온 발생이 증가하였음을 의미한다. 또한 운전압력에 따른 산소 플라즈마에서 측정된 전위차, $e(V_p - V_f)/T_e$ 의 분포의 경우 약 30 mTorr 이하에서 전위차의 급격한 감소를 보였고 약 60 mTorr에서 최소 값을 보였다. 이는 음이온 밀도의 증가는 운

전압력에 민감하게 변화함을 알 수 있었다.

음이온의 발생량이 많아짐에 따라 공간 내에서 음이온과 이온의 재결합이 증가하고 있음을 알 수 있었으며 이는 확산에 의해 벽으로 이온이 손실되는 영역에서 재결합 손실 영역으로 전이함을 관찰하였으며 Chung의 global 모델을 이용하여 얻어진 결과와도 같은 경향을 보였다.

따라서 본 연구에서 이용한 새로운 측정방법으로 정전 탐침에서 측정되는 전류비와 전위차의 경향을 관찰함으로써 산소 플라즈마에서 발생하는 음이온의 발생 경향을 관찰할 수 있었으며, 이러한 측정방법을 이용하여 산소 플라즈마를 사용하는 반도체 제조 공정조건의 선정 등에 활용할 수 있을 것으로 사려된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 교육부 두뇌 한국21 과제(BK21)와 2001년 한빛 이용자 육성 프로그램 연구지원과제 및 1998년도 한국학술진흥재단(KRF-98-016-E00100)에서 연구비를 지원 받아 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] D. A. Carl, D. W. Hess, M. A. Lieberman, T. D. Nguyen and R. Gransky, *J. Appl. Phys.* **70**, 3301, (1991).
- [2] I. G. Kouznetsov, A. J. Lichtenberg, and M. A. Lieberman, *Plasma Source Sci. Technol.* **5**, 662, (1996).
- [3] A. J. Lichtenberg, V. Vahedi, M. A. Lieberman, and T. Rognien, *J. Appl. Phys.* **75**(5), 2339 (1994).
- [4] I. D. Sudit and F. F. Chen, *Plasma Source Sci. Technol.* **5**, (1996).
- [5] I. D. Sudit and F. F. Chen, *Plasma Source Sci. Technol.* **3**, (1994).
- [6] T. H. Chung, H. J. Yoon, and D. C. Seo, *J. Appl. Phys.* **86**, 3536 (1999).
- [7] A. J. Lichtenberg, M. A. Lieberman, I. G. Kouznetsov, and T. H. Chung, *Plasma Source Sci. Technol.* **9**, 45 (2000).
- [8] H. Amemiya, *J. J. Appl. Physics*, **27**, 1966 (1988).
- [9] H. Amemiya, *J. Phys. D.*, **23**, 999 (1990).
- [10] J. T. Gudmundsson, and M. A. Lieberman, *Plasma Source Sci. Technol.* **7**, 1 (1998).
- [11] N. Hershkowitz, *How to Langmuir Probes work, in Plasma Diagnostics. vol 1. ed. by O. Auciello, D. L. Flamm (Academic Press, New York), (1990).*
- [12] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, *Principle of Plasma Discharges and Materials Processing (John Wiley & Sons, INC.), (1994).*