

## 플라즈마 삽입전극의 전류에 미치는 밀도 구배의 영향

황휘동<sup>1</sup>, 구치욱<sup>2</sup>, 정경재<sup>3</sup>, 최재명<sup>3</sup>, 김곤호<sup>3</sup>, 고광철<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> (주)효성중공업 중공업연구소

<sup>2</sup> 한양대학교 전기공학과

<sup>3</sup> 서울대학교 원자핵공학과

### Influence of the Density Gradient on the Current of the Electrode Immersed in the Non-uniform Plasma

Hui-Dong Hwang<sup>1</sup>, Chi-Wuk Gu<sup>2</sup>, Kyung-Jae Chung<sup>3</sup>, Jae-Myung Choe<sup>3</sup>,  
Gon-Ho Kim<sup>3</sup>, and Kwang-Cheol Ko<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> Hyosung Corporation, Power & Industrial Systems R&D Center, Changwon 641-712, Korea

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>3</sup> Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, Seoul 151-724, Korea

(Received January 3, 2011; Revised February 3, 2011; Accepted May 5, 2011)

**Abstract:** The conducting current of non-uniform plasma immersed electrode consists of ion current and secondary electron emission current caused by the impinging ion current. The ion current is determined by the ion dose passing through the sheath in front of electrode and the ion distribution in front of the electrode plays an important role in the secondary electron emission. The investigation of the distributed plasma and secondary electron effect on electrode ion current was carried out as the stainless steel electrode plugged with quartz tube was immersed in the inductively coupled Ar plasma using the antenna powered by 1 kw and the density profile was measured. After that, the negative voltage was applied by 1 kV~6 kV to measure the conduction current for the analysis of ion current.

**Keywords:** Secondary electron emission coefficient, Conducting current, Ion current density, Plasma density distribution, Non-uniform plasma

#### 1. 서론

플라즈마 내에 삽입되어 있는 전극에 음전압을 인가하면 입사 이온에 의한 이차전자방출이 발생하여 전극에 흐르는 전도 전류는 전극으로 입사하는 이온 전류와 그 이온에 의해 발생하는 이차전자 방출 전류의 합으로 결정된다. 이 전도 전류 중 이온전류는 플라즈마에 삽입된 안테나와 플라즈마 사이의 상호작용

이나 전자빔 발생, 이온빔전류 측정, 이온 스퍼터링, 플라즈마 이온 주입장치(PSII)의 이온 도스 결정 등에서 중요한 역할을 차지한다 [1,2].

플라즈마 이온 주입 장치는 전기재료의 표면 처리나 박막의 결정 성장, 반도체 플라즈마의 이온 주입 공정 등 재료분야에 그 활용 범위를 넓혀가고 있다. 일반적인 이온 주입 장치의 구조는 플라즈마 내부에 위치한 금속전극에 전압을 인가하여 이온을 주입하는 형태이다. 이때 전극으로 입사하는 이온의 양은 중요

a. Corresponding author; kwang@hanyang.ac.kr

한 인자이나 직접적인 측정이 힘들어 전극에 흐르는 전류를 이용하여 간접적인 계산을 한다. 이때 이온 전류의 계산에 사용되는 플라즈마 밀도는 삽입 전극의 주변이 밀도 구배를 가지므로 인가전압 별로 다른 밀도값을 적용해야 한다.

쉬스 내 이온간의 충돌을 무시할 수 있는 비충돌, 약전리 플라스마에서 전극으로 입사하는 이온의 양은 쉬스를 통과하는 이온의 양과 동일하다 [3]. 따라서 전극에 흐르는 이온전류는 전극 전면의 쉬스를 통과하는 이온의 선속으로부터 구할 수 있다. 쉬스를 통과하는 이온의 선속은 쉬스 경계면의 플라즈마 밀도와 관계가 있다. 또한 전극에 음전압이 인가되면 쉬스가 플라스마 속으로 진행하여 이온이 통과할 수 있는 면적이 더 늘어나는 효과가 나타난다. 따라서 이 두 가지 요인에 의해 전극에 인가된 전압이 높아질수록 이온 전류는 점점 증가하게 된다.

본 연구에서는 이온 전류에 영향을 주는 인자 중 플라스마 밀도 분포에 따른 효과를 조사하였다. 이러한 연구는 비균질 플라스마의 특성을 파악하고 쉬스의 거동을 이해하기 위한 기초적인 연구이다. 기존의 연구를 살펴보면 전극에 인가된 전압이 일정하고 플라스마 밀도가 일정한 경우 쉬스를 통과하는 이온 전류를 구하는 식은 일반적으로 알려져 있다 [1]. 이를 이용하여 일반적으로 이온전류를 계산할 때 플라스마의 밀도 구배를 고려하지 않고 플라스마 밀도를 하나의 값으로 두고 계산한다. 그러나 인가전압이 변화할 경우 전극 전면의 쉬스가 전개하므로 쉬스가 접하게 되는 플라스마의 밀도는 인가전압에 따라 틀려진다. 그러므로 보다 정밀한 이온 도즈량을 얻고 제어하기 위해서는 각 전압에 맞는 쉬스 전개를 구하고 그 위치에서의 플라스마 밀도를 각각 적용하는 플라스마 분포 효과에 대한 쉬스 이온 전류 연구가 필요하나 이에 대한 연구는 아직 미흡하다. 이전 연구에서 플라스마 밀도 구배를 고려한 이온 전류 계산 연구를 수행하였으나, 전극에 수직한 방향으로의 분포만 고려하였다 [4]. 그러나 실제 플라스마의 밀도는 수직, 수평 분포를 모두 가지므로 그 둘을 모두 고려하여 밀도를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 정전탐침을 이용하여 플라스마 내에 삽입된 금속 전극에 의해 재배치된 플라스마 밀도를 직접 측정하고, 인가전압에 따른 쉬스의 위치를 확인하여 각 인가 전압에서 쉬스를 통과하는 이온 전류를 계산하였다. 그 결과와 측정된 전극 전류를 비교함으로써 본 연구의 모델에 대한 신뢰성을 확인하였다.

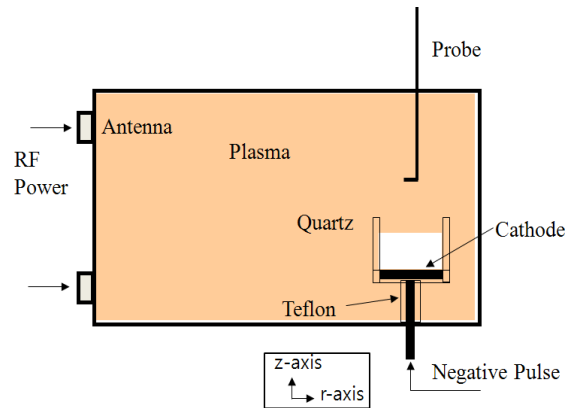


Fig. 1. Schematic diagram of experiment device.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 장치

그림 1에 실험 장치의 개념도를 보였다. 음전압 직류전원을 이용하여 커패시터를 충전하고 고전압 반도체 스위치를 이용하여 커패시터를 방전시킴으로써 챔버 내에 삽입된 지름 10 cm의 평면 전극(스테인레스 스틸 304)에 음펄스 전압을 인가시켰다. 전극이 삽입되어 있는 챔버는 지름 50 cm, 길이 60 cm로 전극은 안테나로부터 40 cm 떨어진 곳에 위치시켰다. 챔버 내부는 2-turn 안테나를 이용한 유도결합형 Ar 플라스마를 발생시켰고, 압력은 0.5 mTorr, 안테나 입력 전력은 1,000 W를 입력하였다. 평판 전극의 뒷면은 테플론으로 절연시켰으며 전극의 옆면을 절연하기 위해 10 cm 길이의 원통형 석영 유리를 씌웠다. 이때 옆면을 절연시키는 이유는 전극에 음펄스 전압을 인가했을 때 옆면으로 전개하는 쉬스의 영향을 배제시키고 전극 전면의 쉬스 전개 영향만을 고려하기 위해서이다. 정전탐침을 이용하여 석영 유리 튜브 내의 전극에 평행한 방향(R축)과 수직한 방향(Z축)의 밀도를 측정하였다. 전자 온도는 평균 3.02 eV이고 음전원의 출력 전압은 1 kV~6 kV까지 변화시켰다.

전극에 걸리는 전압과 전류파형의 일반적인 형태를 그림 2에 보였다. 전압은 Tektronix사의 P6015A 프로브를 이용하여 측정하였으며, 전류는 피어슨 코일(power designs의 CVT-1A)을 이용하여 측정하였다. 전류파형은 약 20  $\mu$ sec 이후에 일정한 값을 확인할 수 있다. 즉 20  $\mu$ sec 이후 전개되어있는 쉬스는 전압

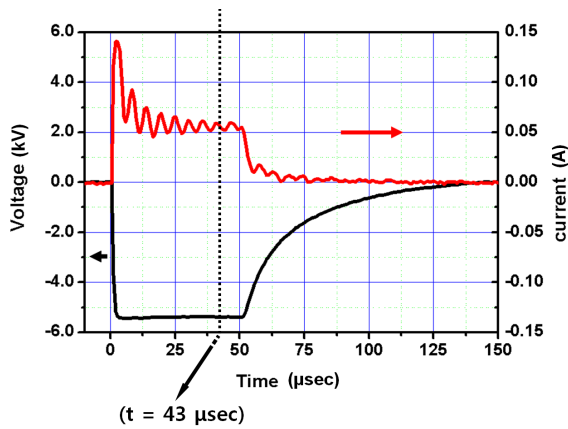


Fig. 2. Typical voltage and current profile of target.

의 시간적 변화가 없는 Child-langmuir 쉬스로 볼 수 있다 [5]. 본 연구에서는 쉬스가 전개되어 안정화 될 때까지 충분한 여유를 주기 위해 43  $\mu\text{sec}$ 에서 측정된 전압, 전류를 계산에 이용하였다.

플라즈마에 삽입된 전극에 장착된 튜브로 인해 반응기 내의 플라즈마는 튜브 내로 확산되어 분포하므로 전극 전면의 플라즈마는 밀도 구배를 가지게 된다. 실험에서는 전극에 전압을 인가하지 않았을 때, 튜브 내부 전극 전면의 플라즈마 밀도를 r축과 z축 방향으로 측정하였다. 그 후 전극에 음전압이 인가되었을 때 쉬스가 전개된 위치를 구하여 이전에 구한 플라즈마 밀도 분포에서 쉬스의 위치에 따른 밀도를 결정하였다. 즉 인가전압 별 쉬스의 전개 크기와 그 쉬스가 접하게 되는 플라즈마의 밀도를 얻을 수 있다. 이를 통해 쉬스를 통과하여 전극에 입사하는 이온 전류 밀도를 구할 수 있고 여기에 이온에 의해 유도된 이차전자 방출 전류를 더하면 전극의 전도 전류를 얻을 수 있다. 최종적으로 앞의 방법으로 구한 계산값과 실제 전극에서 측정한 전도 전류를 비교하여 본 논문의 모델에 대한 검증을 실시하였다.

## 2.2 배경 이론

일반적으로 안정화된 Child Langmuir 쉬스의 크기는 다음과 같이 정의된다 [6].

$$s = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{en_0}} \left( \frac{2V_0}{T_e} \right)^{3/4} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율이고,  $T_e$ 는 플라즈마 전자온도이다.  $V_0$ 는 전극에 인가된 전압을 의미한다. 플라즈마 전자온도는 정전 탐침을 이용하여 측정하였다.

금속전극에 고에너지의 이온이 충돌하면 일반적으로 이차 전자가 방출된다. 이때 발생하는 이차전자의 양은 실험적으로 전극에 입사하는 이온 에너지의 1/2 승에 비례하고, 그 비례 상수는 이차전자 방출계수이다 [7]. Szapiro [7]와 Shamim [8] 등은 전극의 재질과 플라즈마의 인입가스에 따른 이차전자 방출계수를 실험적으로 구하는 연구를 진행하였으며 본 연구에서는 Shamim이 실험적으로 얻은 이차전자 방출계수와 입사이온의 에너지 사이의 관계식을 이용하였다.

$$\gamma(V) = \gamma_{20k} \sqrt{\frac{V}{20k}} \quad (2)$$

여기서  $\gamma_{20k}$ 는 이온의 에너지가 20 keV일 때의 이차전자 방출계수이고, Szapiro에 따르면 스텐레스 스틸에 Ar이온이 충돌할 때 이차전자 방출계수는 4.0이다.

플라즈마로부터의 이온 전류 밀도를  $J_i$ 라 하면 쉬스를 통하여 전극으로 흐르는 이온 전류  $I_i$ 는 다음과 같다.

$$I_i = J_i A = n_s e C_s A \quad (3)$$

여기서  $e$ 는 전자의 전하량이고, Bohm 속도  $C_s = \sqrt{T_e/m_i}$ 에서  $m_i$ 는 이온의 질량을 의미한다.  $A$ 는 쉬스의 면적으로 쉬스가 튜브 내에서만 전개하므로 튜브의 단면적과 일치한다.  $n_s$ 는 쉬스가 전개되어 있는 위치의 플라즈마 밀도를 의미하는데 플라즈마 밀도가 z축 뿐만 아니라 r축으로도 구배를 가지므로 특정한 하나의 값으로 정하기가 어렵다. 이후의 실험에서 제시한 값을 이용하여  $n_s = 0.6n_0$ 로 결정하였다.

전극에서 측정되는 전류는 입사하는 이온에 의한 이온전류와 입사이온에 의해 전극에서 방출되는 이차전자전류로 이루어졌다고 가정하였고 이차전자전류는 입사이온과 이차전자 방출계수의 곱으로 구할 수 있으므로 전극에 흐르는 총 전도 전류는 다음과 같다.

$$I(V) = I_i + I_e = 0.6n_0 e C_s A \left( 1 + \gamma_{20k} \sqrt{\frac{V}{20k}} \right) \quad (4)$$

식 (4)를 다시 정리하여 식 (5)를 구할 수 있다. 여기서 좌변은 전극에서 측정된 전류와 플라즈마 밀도를 이용하여 계산한 Bohm 속도의 비로 나타낼 수 있고, 우변은 입력전압의 변화만 있는 항이 된다.

$$\frac{I}{0.6n_0C_s} = eA \left( 1 + \gamma_{20k} \sqrt{\frac{V}{20000}} \right) \quad (5)$$

따라서 식 (5)의 우변은 입력전압에 의해서만 값이 변하고, 입력 전압이 없을 때는 상수  $eA$ 의 값으로 수렴한다. 이 식으로부터 전극의 입력 전압이 일정하다면 플라즈마의 밀도 분포가 변화해도 그 영향으로 좌변의 다른 변수들이 같이 변화하여 그 비는 일정하여야 한다.

### 3. 결과 및 고찰

플라즈마의 밀도 분포가 전극 전도 전류에 미치는 영향을 확인하기 위해 전극 전면의 플라즈마 밀도 측정을 전극에 평행한 방향과 전극에 수직인 방향 두 방향으로 나누어서 측정하였고 밀도 분포를 이용하여 쉬스 전개 위치를 계산하여 측정값과 비교하였다. 그리고 식 (5)의 우변과 좌변의 값을 각각 구하여 비교함으로써 본 논문에서 제시한 모델에 대한 신뢰도를 확인하였다.

그림 3에서 전극에 입력 전압이 없을 때 튜브내부의 전극과 평행한 방향(r축 방향) 플라즈마 밀도 분포를 정규화하여 보였다. 전극의 전면은 원형이므로 중심을 0으로 두고 반응기의 안테나를 향한 방향을 양으로 그 반대 방향을 음으로 정하여 측정하였다. 전극의 중심선에 가까울수록 밀도가 높고 중심선에서 멀어질수록 밀도가 떨어지는 포물선 형태의 분포를 보이고 있다. 그러므로 쉬스의 위치는 중심과 튜브근처가 서로 다르게 전개되고 중심선상의 밀도는 전체 쉬스가 접하게 되는 밀도 중 가장 높은 밀도이므로 이를 보정하기 위해 전극의 중심선으로부터 4.5 cm 떨어진 지점의 밀도를 선정하였고 중심의 밀도와 비교하면 대략 60%임을 확인할 수 있었다. 이는 튜브에 가까울수록 밀도의 하강폭이 높기 때문이다. 다만 일반적으로 플라즈마의 밀도는 안테나와 가까울수록 높은 경향을 보이는데 본 실험에서도 양의 방향은 안테나와 가까워지는 방향이므로 음의 방향보다 좀 더 높은 값을 가지는 분포를 보이는 것으로 보인다.

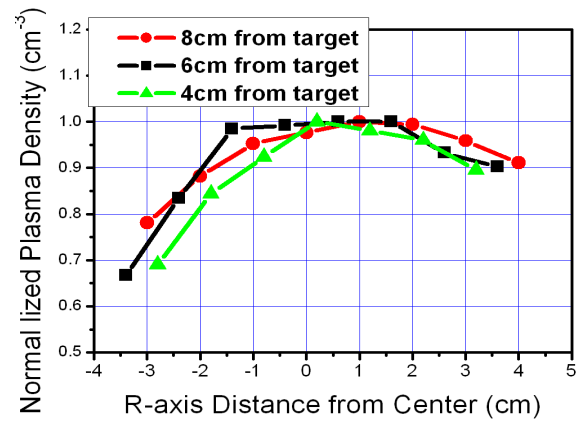


Fig. 3. R-axis normalized density distribution inside tube.

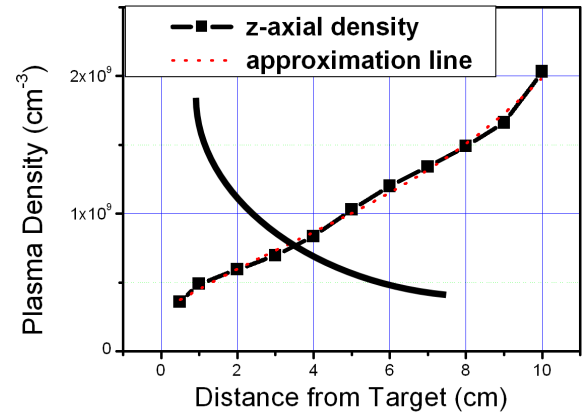


Fig. 4. Z-axis density distribution inside tube.

그림 4는 튜브 내부의 전극에 수직인 방향(z-축 방향) 밀도 분포 측정 결과이다. 플라즈마 밀도는 전극에서 멀어질수록 높아지고 있다. 이 분포는 전극의 중심선 상(r축 기준으로 0)에서 측정한 것으로 실제 계산에서는 쉬스 경계조건을 가정하여 이 값에 0.6을 곱한 값을 이용하게 된다.

그림 4의 밀도 분포를 이용하여 쉬스의 전개 위치를 계산하기 위해 식 (6)의 3차 다항식으로 근사화한 선을 점선으로 표시하였다.

$$n_p = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (6)$$

실선은 식(1)의 Child-Langmuir 쉬스를 의미한다. 두 곡선은 서로 교차하고 그 교점의 x좌표는 쉬스가 전개되어 있는 위치를 의미하고 y좌표는 전개된 쉬스

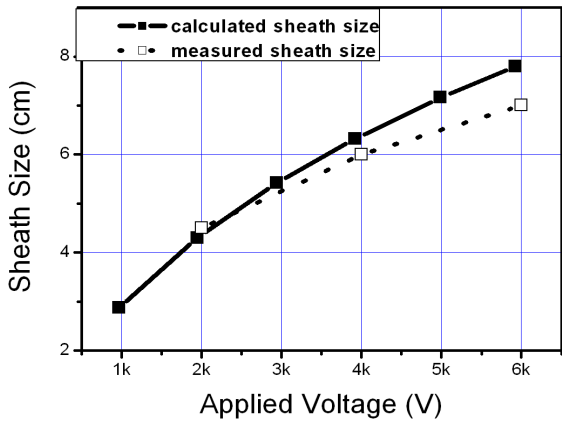


Fig. 5. Sheath size for various applied voltage.

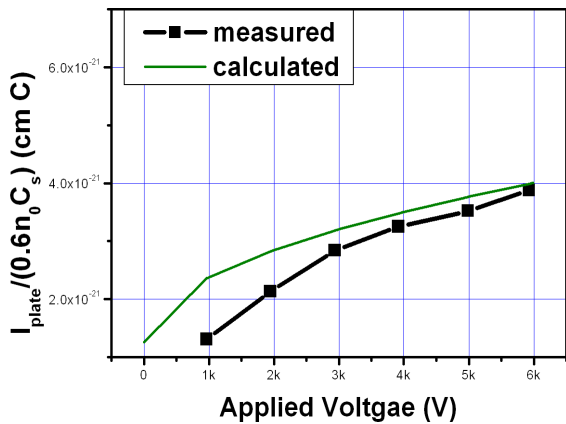


Fig. 6. Ratio of ion current with Bohm velocity for various applied voltage.

가 접하는 플라즈마 밀도를 의미한다.

그림 4에서 구한 쉬스의 전개 위치와 정전 탐침을 이용하여 구한 각 인가전압에서의 쉬스 전개 위치를 그림 5에서 비교하였다. 쉬스를 직접 측정한 방법은 Kim 등의 방법을 이용하였다 [9]. 두 값은 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 다만 인가전압이 4 kV 이상일 때 약간의 차이를 보이고 있으나 이는 계산상으로 구한 값은 전극에 전압을 인가하지 않았을 경우의 값이고 정전 탐침으로 측정한 값은 전극에 전압을 인가한 경우의 값으로 전극에 인가된 전압에 의해 플라즈마 밀도가 영향을 받아 밀도의 재배치가 이루어짐으로 인한 차이로 보인다. 그러므로 본 실험에서 구한 밀도분포를 이용하는 식 (5)의 좌변에 대입하여서 이 밀도분포를 이용하여 구한 전류의 비와 우변에

서 전극 전압을 이용하여 구한 값과의 비교를 통해 본 논문에서 제시한 모델을 검증하였다.

식 (5)의 좌변은 정전탐침을 이용한 측정이 포함된 값이고 우변은 전극에서 측정된 값이다. 그림 6에 좌변에 밀도를 대입하여 계산한 그래프를 실선으로 나타내었고 우변에 측정 전압을 대입한 그래프는 네모로 나타내었다. 두 값은 각각 다른 방법으로 측정하고 계산된 값으로 그림 6에서 확인하듯이 경향은 잘 일치하고 있으며 특히 입력전압 3 kV 이상에서 거의 일치하고 있다. 3 kV 보다 낮은 전압에서 보이는 차이는 식 (5) 좌변의 분모 항의 보정계수로 0.6 보다 더 낮은 값이 요구되는 것으로 보인다. 이는 그림 3의 플라즈마 수평분포에서 보이듯이 전극에 인가된 전압이 낮을수록 튜브 가까운 곳에서 밀도의 하락폭이 커지기 때문이다. 그러나 전압이 충분히 높아지면 본 모델에서 제시한 보정계수가 잘 적용되고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

플라즈마에 삽입된 금속 전극의 이온 도즈량의 계산은 이온 주입 장치 등 실제 응용에서 중요한 요소이다. 그러나 직접적인 측정이 어려우므로 전극에 흐르는 전압, 전류를 이용하여 간접적으로 이온 전류를 계산하게 된다. 이때 이온 전류는 전극 전면의 플라즈마 밀도구배에 의해 영향을 받는데 본 연구에서는 전극 주변의 밀도분포를 이용해서 쉬스 전개 위치와 그 밀도를 계산하였고, 실제 전극에 전압이 인가되었을 때 정전탐침으로 측정된 쉬스의 전개위치와 비교, 검증하였다. 이를 통하여 본 연구 방법에 대한 신뢰도를 확인하였고, 밀도를 변수로 가지는 이온 전류와 전극에 인가된 전압을 변수로 가지는 이온 전류가 잘 일치하고 있음을 확인했다. 이를 통해 정확한 이온 전류 계산을 위해서는 각 인가전압 당 쉬스가 전개된 위치의 밀도를 적용하는 것이 필요하다는 점을 확인하였다. 또한 플라즈마의 밀도 구배가 전극에 수직인 방향뿐만 아니라 수평 방향으로도 존재하므로 본 연구에서는 수평방향 밀도 구배를 고려하기 위한 보정계수 0.6을 제시하였다. 즉 전극에 입사하는 이온의 양을 결정하기 위해서는 전극 전면의 밀도구배가 중요한 인자라는 점을 확인하였다. 이 결과는 실제 응용에서 고전압 쉬스의 거동에 대한 기초자료로써 활용될 수 있다.

## REFERENCES

- [1] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (John Wiley & Sons, Inc., 2005) 526
- [2] E. Stamate, N. Holtzer, and H. Sugai, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 261501 (2005).
- [3] R. A. Stewart and M. A. Lieberman, *J. Appl. Phys.*, **70**, 3481 (1991).
- [4] J. M. Choe, K. J. Chung, H. D. Hwang, Y. S. Hwang, K. C. Ko, and G. H. Kim, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, L686 (2006).
- [5] Y. W. Kim, G. H. Kim, S. H. Han, Y. Lee, J. Cho, and S. Y. Rhee, *Surf. Coat. Technol.*, **136**, 97 (2001).
- [6] C. D. Child, *Phy. Rev.*, **22**, 492 (1911).
- [7] B. Szapiro and J. J. Rocca, *J. Appl. Phys.*, **65**, 3713 (1989).
- [8] M. Shamim, J. T. Scheuer, and J. R. Conrad, *J. Appl. Phys.*, **70**, 4756 (1991).
- [9] G. H. Kim, Y. W. Kim, S. Han, H. S. Uhm, J. Cho, M. J. Jung and M. Hong, *J. Appl. Phy.*, **93** 1384 (2003).