

고밀도 유도결합 플라즈마 장치의 O₂ 방전에 대한 공간 평균 시뮬레이터 제작

김형용, 윤남식, 권득철, 김정형*, 정광화*, 신용현*
 충북대학교, 한국표준과학연구원*

Development of Global Simulator of O₂ Discharge in High Density Transformer Coupled Plasma Source

Hyung-Yong Kim, Nam-Sik Yoon, Deuk-Chul Kwon, Jeong-Hyung Kim*, Kwang-hwa Jeong*, Yong-Hyun Sin*
 Chungbuk National University, Korea Research Institute of Standards and Science*

Abstract : 고밀도 유도결합 플라즈마 장치의 O₂ 방전에 대한 공간 평균 시뮬레이터를 제작하였다. 제작된 시뮬레이터는 O₂ 플라즈마 방전에서 발생하는 전자, 양이온, 음이온 및 중성종, 활성종들에 대해 공간 평균된 유체 방정식을 기반으로 하고 있으며, 고밀도 유도결합 플라즈마 장치에서 전자가 열 모델은 anomalous skin effect를 고려한 파워 흡수 모델을 적용하여 전자가 흡수하는 고주파 파워량을 결정하였다. 완성된 시뮬레이터에서 RF-파워, gas-inlet, pumping-speed 등의 조정 변수를 비롯한 여러 가지 장치 변수들의 변화에 대한 하전입자, 중성종, 활성종들의 밀도 변화 및 전자 온도 의존성을 계산하였다.

Key Words : 고밀도 유도결합 플라즈마 장치, 공간 평균, Anomalous Skin Effect

1. 서 론

플라즈마 발생 장치 중 ICP(Inductively Coupled Plasma) 장치는 구조의 간단함에도 불구하고 고밀도의 균일한 플라즈마를 낮은 공정 압력대에서 효율적으로 발생시키는 이점이 있어 산업계에서 특히 주목 받고 있다.

본 연구에서는 감광제의 세정, 산화막의 증착 등에 널리 사용되고 있는 O₂ 가스에 대한 ICP 장치에서의 플라즈마 방전에 대해 연구하였다. 낮은 pressure에서의 전자가 열 현상은 anomalous skin effect를 고려한 비충돌 power 흡수과정으로 설명이 되고, 이를 고려한 파워 흡수 모델을 공간 평균 수송 모델과 결합한 O₂ 플라즈마 시뮬레이터 제작에 이번 연구의 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 공간 평균 모델링

시공간적인 전자와 각 종들에 대한 밀도, 온도 유체 방정식을 풀어서 O₂ 가스의 플라즈마 방전 특성을 조사할 수도 있지만, 본 연구에서는 수송 방정식을 반응로 내에서 공간평균한 GLOBAL 모델식들을 통해 전체적인 방전 특성을 조사하였으며, 사용된 모델식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \sum_{j,k} k_{ij} n_e n_j + \sum_j k_{ijk} n_j n_k - n_i v_{loss,i} - n_i (\sum_j k_{ij} n_e + \sum_{j,k} k_{ij} n_k) + \frac{Q}{\Omega} - \frac{v_p n_i}{\Omega} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{3}{2} n_e T_e \right) = \frac{P_{abs}}{\Omega e} - \sum_N \epsilon_c k_{iz,N} n_e - \sum_i v_{l,i}(\epsilon_i) \quad (2)$$

$$\Phi_f = - \frac{T_e}{2e} \ln \left[\frac{2\pi m_e}{M} \right], \quad \epsilon_{loss} = - \Phi_f + 2T_e \quad (3)$$

$$v_{loss,i} = \frac{A_{eff}}{\Omega} \sqrt{\frac{T_e}{M_i}}, \quad A_{eff} = 2\pi R(Rh_L + Lh_R) \quad (4)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_{iz} + \sum_i \epsilon_{ex,i} \frac{k_{ex,i}}{k_{iz}} + \frac{k_{el}}{k_{iz}} \frac{3m_e}{m_i} T_e \quad (5)$$

여기서 n_i, n_j, n_k는 i종, j종, k종 입자의 밀도이고, n_e는 전자의 밀도, n_N는 중성종의 밀도이다. k_{ij}는 전자가 j종 입자와 충돌해 i종 입자를 생성시키는 반응의 반응계수, k_{ijk}는 j종 입자가 k종 입자와 반응해 i종 입자를 생성시킬 때의 반응계수이다. Q와 v_p는 가스의 유입량과 Pumping speed이다. P_{abs}는 흡수된 파워, k_{iz,j}는 j종 입자의 이온화 반응계수, ε_{iz,j}는 이온화 에너지, ε_{ex,i}는 여기 에너지, ε_i는 챔버벽으로의 손실 에너지를 나타낸다. k_{iz}는 이온화 주파수, v_{l,i}는 손실 주파수이며 Φ_f는 floating potential, Ω는 챔버의 체적, A_{eff}는 반응로 내부와 sheath edge에서의 양이온 밀도 비율 h factor[3]를 고려한 유효 표면적이다 그리고 T_e는 전자의 온도, M은 이온의 질량 m_e는 전자의 질량을 나타낸다. ε_c는 전자와 중성종과의 충돌로 인한 에너지 손실이다. O₂ 가스의 데이터는 Gudmundsson[1], Baeva[2], Lieberman[3] 등이 정리하였다. 고려된 종은 표 1과 같다.

중성종	O, O ₂ , O ₃
활성종	O(¹ D), O ₂ (a ¹ Δ _g)
하전 입자	O ⁺ , O ₂ ⁺ , e, O ⁻ , O ₂ ⁻ , O ₃ ⁻

표 1. 고려된 이온, 중성종 및 활성종들

2.2 Power 흡수 모델

본 연구에서는 0-D 비충돌 전자 가열 과정 모델을 적용하여 전자가 흡수하는 파워량을 계산 하였다. 낮은 pressure에서의 비충돌 플라즈마 surface impedance[4]를 적용하여 power transfer coefficient를 계산 하였고, 이때 변압 기형 등가회로 모델을 이용한 α 는 다음과 같이 표현된다.[5]

$$P_{abs} = \alpha P_{RF}, \quad \alpha = \left(\frac{R_c}{R_p} \frac{|Z_{in} - i\omega L_{ext}|}{\omega^2 M^2} \right)^{-1} \quad (6)$$

2.2 시뮬레이션 결과

반경 15 cm, 세로 7 cm의 원통형 반응로에서 시뮬레이션이 이루어졌다. Q=50 SCCM인 상황에서 pressure은 pumping speed의 조절로 맞추어 졌다.

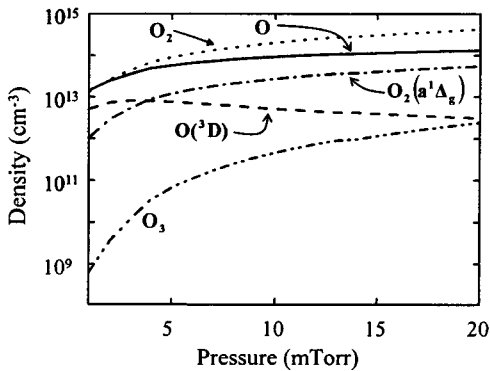


그림 2. 중성종 밀도의 Pressure 의존성

그림 2는 500 W의 RF power에서 중성종 입자 밀도의 pressure 의존성으로, 낮은 pressure에서 O₃의 밀도는 다른 종들에 비해 무시할 수 있다. pressure가 증가 함에 따라 O₂의 비율이 높아짐을 알 수 있다.

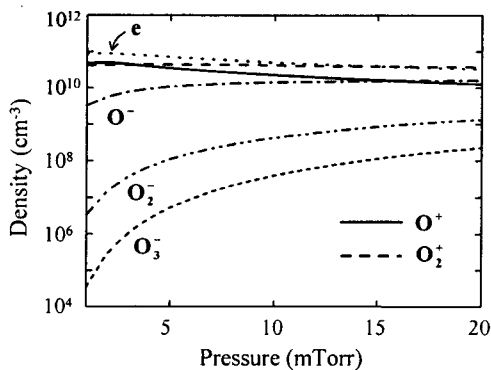


그림 3. 하전입자 밀도의 Pressure 의존성

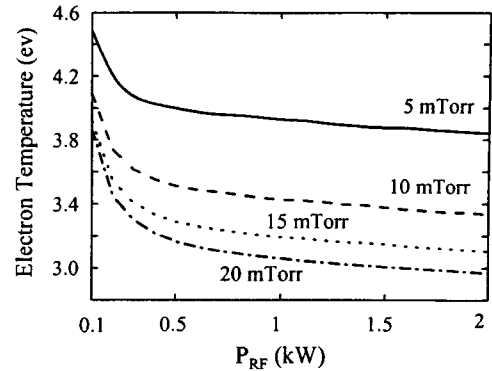


그림 4. 전자 온도의 P_{RF} 의존성

그림 3은 500 W의 RF power에서 하전 입자 밀도의 pressure 의존성으로 음의 전하 구성은 전자와 O⁻로 이루어짐을 알 수 있다. 상대적으로 양이온의 밀도 변화는 그리 크지 않고, 음이온은 O⁻가 주가 된다

그림 4는 여러 pressure에서 전자 온도의 RF power의존성이다. 모든 pressure에서 RF power가 증가할수록 전자 온도가 감소함을 알 수 있다.

3. 결론

비충돌 전자 가열 모델을 적용한 고밀도 유도 결합 플라즈마 장치의 O₂방전에 대한 공간 평균 시뮬레이터를 제작하였으며, RF-파워, gas-inlet, pumping-speed등의 조정 변수를 비롯한 여러 가지 장치 변수들의 변화에 대한 하전입자, 중성종, 활성종들의 밀도 변화 및 전자 온도 의존성을 계산하였다. 현재 본 연구 결과를 바탕으로 충돌과 비충돌 상황, 그리고 이 두 상황을 모두 고려한 파워 흡수 모델들을 비교하여 연구 중이며, 그리고 이를 결합한 (r, z)-2차원 시뮬레이터의 연구, 개발 활동이 활발히 진행 중이다.

감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원의 표준과학연구원의 진공기반기술 구축사업의 지원을 받아 수행되었음

참고 문헌

- [1] J. T. Gudmundsson, I. G. Kouznetsov, K. K. Patel and M. A. Lieberman J. Phys. D vol 34, 1100 (2001)
- [2] M. Baeva, X. Luo, B. Pfelzer, T. Reipsilber and J. Uhlenbusch. Plasma Source Sci. Technol 9. 128(2000).
- [3] M. A. Lieberman and Lichtenberg A. J 1994 Principles of Plasma Discharges and Material Processing
- [4] M. M. Turner Phys. Rev. Lett. vol. 71, 1884 (1993)
- [5] N. S. Yoon, S. S. Kim, C. S. Chang and Duk-In Choi J. Kor Phy Soc. vol. 28, No.2 172 (1995).