

평판형 유도결합 플라즈마 장치의 CF₄ 방전에 대한 Global Simulation

권득철, 유동훈, 김성식*, 윤남식, 김정형**, 신용현**
 충북대학교, *기초과학지원연구소, **표준과학연구원

Global Simulation for CF₄ Discharge in Transformer Coupled Plasma Source

Deuk-Chul Kwon, D. H. Yoo, S. S. Kim*, N. S. Yoon, J. H. Kim**, Y. H. Shin**

Chungbuk National University, *Korea Basic Science Institute, **Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - Global simulator for CF₄ discharge in transformer coupled plasma (TCP) source is developed and simulations are performed under various conditions. The developed simulator is based on a set of space averaged fluid equations for electrons, positive ions, neutrals and radicals of CF₄ plasma. And the used absorbed power by electrons is calculated by a 2-dimensional heating model[1].

1. 서 론

플라즈마 etching이란 가스 속에서 방전을 일으켜 가스를 플라즈마화하여 발생한 중성·활성종의 화학반응을 이용하여 가공물의 표면을 가공하는 방법이다. Etching시에 사용되는 플라즈마는 비교적 저압, 저온인 것이 특징이며 이온, 전자, 중성종과 활성종 등이 포함되어 있다. 반도체 제작에서 C/F비는 선택적 식각을 하는데 중요한 parameter이다. 따라서 CF₄ 플라즈마에서 발생하는 주요 활성종, 중성종, 하전입자들의 밀도 변화 및 전자의 온도 의존성, 특히 선택비에 대한 주요 변수인 C/F비를 여러 조정 변수와 장치 변수를 통한 계산이 필요하다.

본 연구에서는 고밀도 플라즈마원인 TCP(Transformer Coupled Plasma) 장치에서의 CF₄ 플라즈마 방전에 대한 global 모델과 전자가열 모델을 통해 C/F비, 파워흡수 계수, 이온 밀도 등의 여러 공정 변수에 대한 의존성을 조사하였다. 0차원 모델식 중에서 전자의 파워 흡수량은 플라즈마 밀도가 균일하다고 가정하고 2차원 가열 모델을 이용하여 결정하였다.

2. 본 론

2-1 Global 모델과 모델식들

CF₄ 가스의 플라즈마 방전 시 발생하는 이온, 중성종 및 활성종들은 매우 많지만 생성 반응 계수가 매우 작은 종들은 제외할 수 있다. 본 연구에서 고려된 종들은 표 1과 같다.

Input gas	CF ₄
Neutral radicals	CF ₃ , CF ₂ , CF, F
Stable products	C ₂ F ₆ , C ₂ F ₄ , F ₂ , C ₂ F ₃ , C ₂ F ₅
Charged species	CF ₃ ⁺ , CF ₂ ⁺ , CF ⁺ , C ₂ F ₄ ⁺ , C ₂ F ₅ ⁺ , F ⁺ , F ₂ ⁺ , CF ₃ ⁻ , F ⁻ , e

표 1. 고려된 이온, 중성종 및 활성종들

시공간적인 전자와 각 종들에 대한 밀도, 온도 유체방정식을 풀어서 CF₄ 가스의 플라즈마 방전 특성을 조사

할 수도 있지만, 본 연구에서는 수송 방정식을 챔버부피 내에서 공간평균한 Global 모델식들을 통해 전체적인 방전 특성을 조사하였으며, 사용된 모델식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \sum_{j,k} k_{ij} n_e n_j + \sum_j k_{ijk} n_j n_k - (n_e + n_i^+) \nu_i - n_i (\sum_j k_{ji} n_e + \sum_{j,k} k_{ijk} n_j n_k) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{2}{3} \frac{P_{abs}}{n\Omega} - \sum_j k_{iz,j} n_j \left(\frac{2}{3} \epsilon_{iz,j} + T_e \right) - \frac{2}{3} \sum_j k_{dis,j} n_j \epsilon_{dis,j} - \left(\frac{2}{3} \epsilon_i + T_e \right) \nu_i \quad (2)$$

$$\phi_f = -\frac{T_e}{2e} \ln \left[\frac{2\pi m_e}{M} \right] \quad (3)$$

$$\epsilon_i = -\frac{T_e}{2} \ln \left[\frac{2\pi m_e}{M} \right] + 2T_e, \quad \nu_i = \frac{S}{\Omega} \sqrt{\frac{T_e}{M}} \quad (4)$$

여기서 n_i는 i종 입자의 밀도이고, n_e는 전자의 밀도, n_j는 j종의 밀도, n_k는 k종의 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. P_{abs}는 흡수된 파워, k_{iz,j}는 j종 입자의 이온화 반응계수, k_{dis,j}는 j종 입자의 해리 반응계수, ε_{iz,j}는 이온화 에너지, ε_{dis,j}는 해리 에너지, ε_i는 챔버벽으로의 손실에너지를 나타낸다. ν_i는 이온화 주파수, ν_i는 손실 주파수이며 φ_f는 floating potential, Ω는 챔버의 체적, S는 챔버의 표면적을 나타낸다. 그리고 T_i는 이온의 온도, T_e는 전자의 온도, M은 이온의 질량 m_e는 전자의 질량을 나타낸다.

CF₄ 가스 방전 시 일어나는 활성종들 간의 화학반응들의 반응계수는 Modica[2], Skinner[3], Plumb과 Ryan[4-5] 등이 측정하였고 데이터 정리는 Kushner[7-8], Edelson[9] 등이 하였다. 전자충돌 산란 단면적 데이터는 Winters[10], Christophorou[11-12], Deutsch[13-14], Sugai[15] 등이 측정 혹은 계산하였고 데이터 정리는 Bonham[16]이 하였다.

2-2 파워 흡수 모델

플라즈마에서 흡수한 파워는 전원의 파워에 비례하므로,

$$P_{abs} = \alpha P_{RF}$$

이다. 여기서 P_{abs}는 흡수된 파워, P_{RF}는 안테나에 입력된 파워, α는 파워 흡수 계수이다. 파워 흡수 계수 α는 기생 임피던스 값들을 무시하면 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{R_p}{R_a + R_p}$$

여기에서 R_p는 플라즈마 저항, R_a는 안테나 저항이며, R_p는 기존에 잘 정립된 2차원 전자가열이론을 기반으로 계산되었다[17].

2-3 시뮬레이션 결과

TCP 장치의 주요 외부 조정 변수는 파워와 압력이며 따라서 시뮬레이터의 주된 결과는 이들 값들에 대한 방전 변수의 의존성이다. 주요 방전 변수는 활성종, 중성종, 양이온, 음이온들의 밀도 및 전자의 온도, 그리고 선택비에 대한 주요 변수인 C/F비이다. 또한 플라즈마에서 흡수되는 파워 흡수 계수의 파워 및 압력 의존성을 계산하였다.

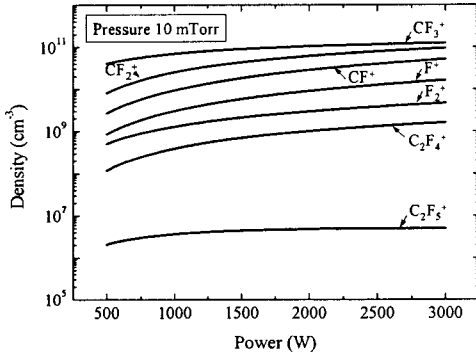


그림 1. 10 mTorr 압력에서 양이온 밀도의 파워 의존성

그림 1은 10 mTorr 압력에서 양이온 밀도의 파워의 의존성을 계산한 결과로, 파워가 증가하면 이온화가 더욱 활발하게 되어 이온 밀도가 증가한다는 의미와 잘 부합된다.

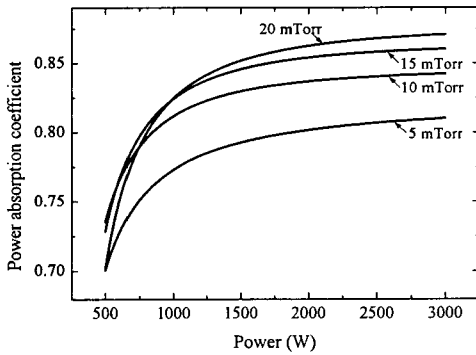


그림 2. 여러 압력에서 파워 흡수 계수의 파워 의존성

그림 2는 여러 압력에서 파워를 변화시키며 파워 흡수 계수를 계산한 결과로, 파워가 증가함에 따라 파워 흡수 계수가 커진다는 것을 보여준다.

그림 3은 그림 2와는 반대로 여러 파워에서 압력을 변화시키며 파워 흡수 계수를 계산한 결과이다. 압력이 증가하면서 파워 흡수 계수가 증가하는 결과를 볼 수 있다. 파워나 압력이 증가하면 플라즈마 밀도 n_p 가 증가한다. 플라즈마 저항 R_p 의 밀도 의존성을 보면 밀도의 변화에 따라 R_p 가 증가하다가 감소하는 모습을 보인다 [18]. 따라서 그림 2와 3은 밀도 변화에 따라 R_p 가 증가하는 영역에 있음을 알 수 있고, 파워나 압력이 증가하면서 파워 흡수 계수가 증가하는 모습이다.

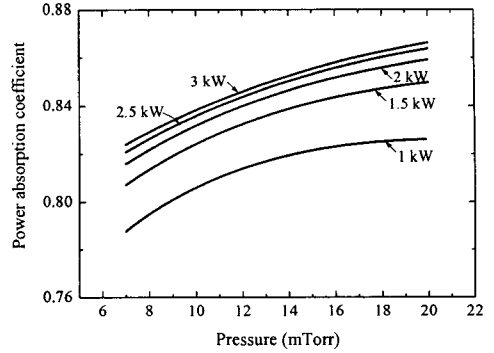


그림 3. 여러 파워에서 파워 흡수 계수의 압력 의존성

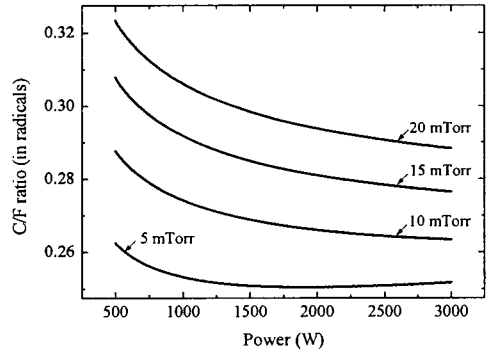


그림 4. 여러 압력에서 활성종들 내의 C/F비의 파워 의존성

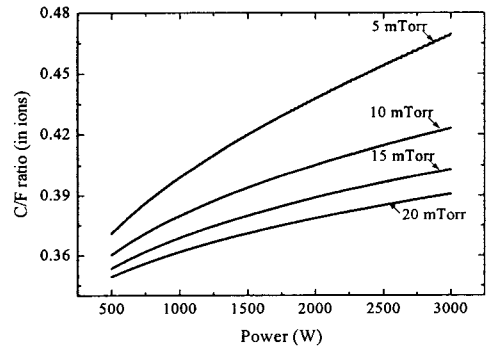


그림 5. 여러 압력에서 이온들 내의 C/F비의 파워 의존성

그림 4와 5는 여러 압력에서 파워를 변화시키며 발생된 이온들과 활성종들 내의 C/F비를 계산한 결과이다. 활성종들과 이온밀도의 파워 의존성을 계산한 결과에 의하면, 파워가 증가할수록 활성종의 밀도 변화는 거의 없고 이온 밀도의 증가율이 크다. 이온들내에서 C/F비 또한 활성종들 내와 비교한 결과 상대적으로 크게 계산되었다. 이로 미루어볼 때 플라즈마에서 발생된 이온이 선

택적 etching을 하는데 중요하게 작용한다는 것을 의미한다[18].

그림 6과 7은 10 mTorr 압력, 500 W 파워에서의 $Re\{E\}$, $Re\{J\}$ 의 공간의존성을 보여준다. 결과에서와 같이 안테나 근처에서 전기장파 전속밀도가 상대적으로 크다는 사실과 플라즈마 챔버의 길이방향으로 skin depth가 형성되는 것을 볼 수 있다.

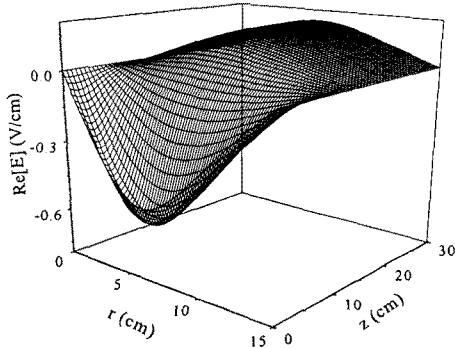


그림 6. 10 mTorr 압력, 500 W 파워에서의 $Re\{E\}$ 의 r, z 의존성

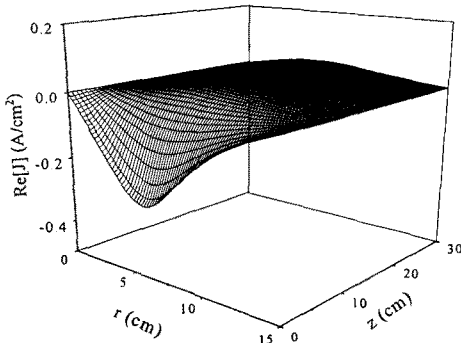


그림 7. 10 mTorr 압력, 500 W 파워에서의 $Re\{J\}$ 의 r, z 의존성

3. 결 론

평판형 유도결합 플라즈마 장치의 CF_4 방전에서의 공정변수들인 RF-파워와 가스압력의 변화에 대한 주요 플라즈마 내의 활성종, 이온들과의 밀도 변화, C/F비, 파워 흡수 계수, RF-전기장파 플라즈마 전류밀도 분포 등을 Global 모델에서 파워 흡수 모델을 결합하여 살펴 보았다.

현재 본 연구 결과를 바탕으로 (r, z)-2차원 simulator를 개발하는 연구, 개발 활동이 활발히 진행 중이다.

* 이 연구는 표준과학연구원의 진공기반기술 구축사업의 지원을 받아 수행되었음

[참고문헌]

- [1] N. S. Yoon, S. M. Hwang and D. I. Choi, "Two-dimensional non-local heating theory of planar-type inductively coupled plasma discharge". Phys. Rev. E, vol.55, no.6, pp 7536-7549 (1997.6)
- [2] Anthony P. Modica and Sylvia J. Sillers, The Journal of Chemical Physics, 48, 3283 (1968)
- [3] Gordon B. Skinner and Gordon H. Ringrose, The Journal of Chemical Physics, 43, 4129 (1965)
- [4] K. R. Ryan and I. C. Plumb, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 4, 141 (1984)
- [5] K. R. Ryan and I. C. Plumb, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 6, 205 (1986)
- [6] K. R. Ryan and I. C. Plumb, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 6, 231 (1986)
- [7] Mark J. Kushner, J. Appl. Phys. 53, 2923 (1982)
- [8] Larry E. Kline and Mark J. Kushner, Solid State and Material Sciences, 16, 1 (1989)
- [9] David Edelson and Daniel L. Flamm, J. Appl. Phys. 56 (5), 1522 (1984)
- [10] Harold F. Winters and Mitio. Inokuti, Phys. Rev. A 25, 1420 (1892)
- [11] S. M. Spyrou, I. Seuers, and L. G. Christophorou, J. Chem. Phys. 78 (12), 7200 (1983)
- [12] S. R. Hunter and L. G. Christophorou, J. Chem. Phys. 80 (12), 6150 (1984)
- [13] H. Deutsch, P. Scheier and T. D. Ma가, Int. J. Mass Spectrom. 74, 81 (1986)
- [14] H. Deutsch, T. D. Mark, V. Tarnovsky, K. Becker, C. Cornelissen, L. Cespiva, V. Bonacic-Koutecky, Int. J. Mass Spectrom. 137, 77 (1994)
- [15] T. Nakano and Hideo Sungai, Jpn. J. Appl. Phys. 31, 2919 (1992)
- [16] Russell A. Bonhham, Jpn. J. Appl. Phys. 33, 4157 (1994)
- [17] N. S. Yoon, S. M. Hwang, and Duk-In Choi, Physical Review E, vol 55, 6, 7536 (1997)
- [18] Deuk-Chul. Kwon, D. H. Yoo, S. S. Kim, N. S. Yoon, J. H. Kim, Y. H. Shin, "Zero-Dimension Modeling and Simulation for CF_4 Plasma Discharge", 2002년도 대한전기학회 충북지부 춘계학술대회 논문집, 6, (2002)
- [19] O. A. Popov, "High Density Plasma Sources" (Noyes, New Jersey, 1995)
- [20] N. S. Yoon, B. C. Kim, J. G. Yang and S. M. Hwang, "A Theoretical Formula of E- and H-discharge Transition Power in a TCP-discharge", IEEE Trans. Plasma Sci. vol.26, no.2, pp190-197 (1998.4)
- [21] N. S. Yoon and S. M. Hwang, "A theoretical Rormula of Transition Power of E- and H-discharge Based on the Transformer Circuit Modal in TCP discharge", J. Korea phys. soc. vol.55, pp657-660 (1997.6)
- [22] N. S. Yoon, J. H. Han, S. M. Hwang and D. I. Choi, "Two-dimentional electron heating of inductively coupled discharge", J. Korea phys. Soc. vol.32, ppS196-S200 (1997.8)
- [23] J. G. Yang, N. S. Yoon, B. C. Kim, J. H. Choi, G. S. Lee and S. M. Hwang, "Power Absorption Characteristic of Inductively Coupled Plasma Discharge", IEEE Trans. Plasma Sci. vol.27, no.3 (1999.6)