

1, 2차 모델링을 이용한 Ar RF 플라즈마의 응답 특성

The Properties of Ar RF Plasma Using 1- and 2-dimensional Model

박용섭*, 정해덕**
(Yong-Sup Park*, Hae-Duck Chung**)

Abstract

We developed 1- and 2-dimensional fluid model for the analysis of a capacitively coupled Ar RF(Radio Frequency) glow discharge. This discharge is in pure Ar gas at the pressure 100[mTorr], frequency 13.56[MHz] and voltage amplitude 120[V]. This model is based on the equations of continuity and electron energy conservation coupled with Poisson equation. 2-dimensional model is simulated on the condition of GEC(Gaseous Electronic Conference cell). The geometry of the discharge chamber and the electrodes used in the model is cylindrically symmetric; two cylinders for the electrodes are surrounded by the grounded chamber. It is shown that 1-dimensional model is very useful on the understanding of RF glow discharge property and of the movement of charged particles.

2-dimensional model predicts off-axis maximum structure as in the experiments and has the results in qualitatively and quantitatively good agreement with the experiments. Effects of dc self-bias voltage, guard ring and reactor geometry is discussed.

Key Words : RF, GEC, 1-dimensional model, 2-dimensional model

1. 서론

플라즈마 프로세서는 반도체 집적회로의 증착 및 에칭뿐만 아니라, 콘덴서 등의 회로소자, 다층배선 등의 기술에 넓게 응용되고 있으며, 전자디바이스의 제작에 주요한 기초기술로 정착되고 있다. 특히 저압 비평형 플라즈마(또는 글로우 방전)를 이용한 CVD(Chemical Vapor Deposition) 및 에칭 기술은 반도체 디바이스의 고성능화, 고속화, 고집적화를 위해 중요한 기술이고, 금후 점점 그 영역과 중요성이 증대된다. 또한, 플라즈마를 어느 정도 확실히 제어

가능 하는가에 의해서, 반도체 프로세서 기술의 동향이 크게 변하게 된다[1,2].

RF 비평형 플라즈마의 핵심은 고온에서 일어나는 화학반응을 저온에서 일어나게 하는 것이 가능하며, 소위 비평형성을 용이하게 실현 가능한 부분에 이점이 있다. 따라서 플라즈마 프로세서에 관한 다각적인 연구가 중요하다고 할 수 있다[3,4].

수치해석에 의한 플라즈마 프로세스 모델링은 1960년대 이후 급속한 연구가 시작되었으며 집적회로 산업의 개발에 주요한 연구로 자리잡고 있다[5-7]. 1차원 모델링은 전자, 이온 및 라지칼의 형성원리를 이해하고 프로세스의 균일성, 증착 및 에칭에 관한 정보를 수집하는데 중요한 파라메타로서 연구되어왔다[8-10]. 그러나 웨이퍼가 대구경화되면서 플라즈마의 균일성 및 전극기판에 입사하는 이온유속에 대한 연구가 요구되면서 2차원 모델링에 대해 관심을 가지게 되었다[11].

* : 송원대학 정보통신과
(광주광역시 서구 광천동,
Fax : 062-367-2266
E-mail : dbds124@songwon.ac.kr)

** : 목포대학교 전기공학과
2001년 5월 28일 접수, 2001년 6월 25일 1차심사완료
2001년 7월 26일 2차심사완료

본 연구에서는 용량결합형 Ar 가스 RF(Radio Frequency) 플라즈마의 특성을 1차원 및 2차원 모델링을 통하여 해석하고자 한다.

2. 모델링

2.1 1차원 모델링

1차원 모델링에서는, 평행평판 전극에 콘덴서를 직렬 연결한 용량결합형 플라즈마(CCP)를 채용하였다(그림 1 참조). 전극 간격(d)은 2.75 [cm], 방전 여기 RF 전원 주파수는 13.56 [MHz], 전원전압은 120[V], 가스온도는 300 [K]로 설정하였다. 또한 결합형 콘덴서 용량(C_b)은 40 [pF], 가스압력은 100 [mTorr]로 설정하였다.

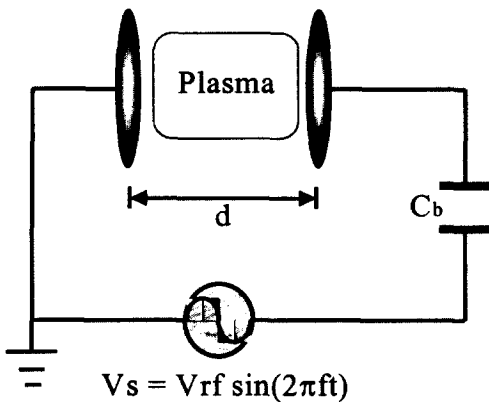


그림 1. 플라즈마 용량결합회로 모델.
Fig. 1. The CCP circuit model.

본 시뮬레이션에 사용된 수치해석 방법으로서 볼츠만 방정식에서 구해지는 전송방정식을 기본으로 한, 1차원 유체모델방법을 채용하였다. 유체모델을 이용해서 RF 플라즈마를 해석하기 위해서는 전자 충돌 계수와 확산계수 및 이동도 등의 파라메타가 필요하다. 이러한 하전 입자의 파라메타는 E/N의 함수 및 전자에너지의 관계로 한 볼츠만 방정식으로부터 구해진 것을 이용한다. 유체모델의 기본 방정식으로 한 대전입자의 전송 식을 아래에 표시하였다. 각 하전입자의 밀도는 1차원 연속 방정식에 의해서 구해진다.

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} = -\frac{\partial \Gamma_j}{\partial x} + N_e \cdot Nk_j \quad (1)$$

$$\Gamma_j = W_j - D_j \frac{\partial N_j}{\partial x} \quad (2)$$

여기서 j는 전자, 정이온을 나타낸다. N_j는 각 하전입자의 밀도, Γ_j는 입자속(flux), k_j는 전리충돌 주파수를 표시한다. N_e는 전자밀도, N은 중성입자밀도, D_j는 확산 계수, W_j는 이동도를 나타낸다. 평균 전자 에너지 및 전계의 함수로 구해지는 각 파라메타를 결정하기 위해, 연속방정식에 에너지 보존식 및 포아송 방정식이 포함되어 진다.

$$\frac{\partial (\epsilon \cdot N_e)}{\partial t} + \frac{\partial q_e}{\partial x} = -\Gamma_e eE - N_e \cdot Nk_L \quad (3)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4)$$

여기서, q_e는 엔탈피 유속(e는 전자 전하), 은 전리 계수 및 전리에너지 손실계수를 나타낸다. V는 전극 포텐셜, ρ는 실 전자 밀도, 는 진공 유전율을 나타낸다. 이동도 및 확산 계수는 일정한 상수로 간략화 하였다.

$$\mu_e = 3.0E5 / PR \quad [cm^2/Vsec] \quad (5)$$

$$\mu_p = 1.44E3 / PR \quad [cm^2/Vsec] \quad (6)$$

$$D_e = 1.20E6 / PR \quad [cm^2/Vsec] \quad (7)$$

$$D_p = 4.00E1 / PR \quad [cm^2/Vsec] \quad (8)$$

여기서, PR은 기압[Torr]를 나타낸다. 전리충돌 주파수 k_j 및 전리손실계수 k_L은 Gogolides 및 Sawin 등에 의해 측정되어진 식을 사용하였다[12].

$$k_j = 8.7E-9 \cdot (\epsilon_e - 5.3) \cdot \exp\left[\frac{-4.9}{(\epsilon_e - 5.3)^{0.5}}\right] \quad (9)$$

$$k_L = -\epsilon_e \cdot k_j + 8.7E-9 \cdot (\epsilon_e - 5.3)^2 \quad (10)$$

k_j 및 k_L은 평균전자 에너지 함수로 계산되어지며, 평균 전자에너지가 5.3 [eV]이상일 경우 사용되어진다.

본 연구에서는 저압력(100 ~ 250 [mTorr]) 및 저전력(인가전압 100 [V])하에서 하전입자와 중성기체간의 상호작용이 중요한 역할을 하지 않기 때문에 무시하였으며, 단지 전자 충돌 전리작용만을 고려하였다.

2.2 경계조건 및 수치해석

전극방향으로 입사하는 전자속은 전자 열속도의 함수로 결정되어진다. 그리고, 전극 및 챔버 벽으로 향한 이온은 전부 흡수되는 것으로 가정하였다.

$$\Gamma_{e,n} = \frac{1}{4} n_e \cdot v_{e,th} \quad (11)$$

$$v_{e,th} = \left[\frac{8k_B T_e}{\pi m_e} \right]^{1/2} \quad (12)$$

여기서 $v_{e,th}$ 는 전자 열속도를 나타낸다. 또한 전극면 에너지 및 전자 2차방출 계수를 0.5 [eV], 0.03 으로 설정하였다. 따라서, 이온유속에 의한 2차방출 전자밀도는 경계면에서 다음과 같이 구해진다.

$$N_{e,2nd} = \frac{\Gamma_p \cdot v}{U_{e,th}} \quad (13)$$

식 (1)~(4)를 계산하기 위해, 간단한 오일러 적분법(Eulerian time integration)을 적용한 도너 셀 계산법(Donor cell algorithm)을 채용하였다[13]. 이 방법은 전극면에서의 하전입자속의 움직임을 결정하는데 유용한 방법이다.

전극간의 격자 분할방법으로서 전극부근에서 하전입자들의 급속한 움직임이 형성됨으로 전극부근에서는 세밀하게, 전극 중앙부에서는 넓게 분할하는 불균등 격자분할 시스템을 도입하였다[14].

$$x_i = \frac{d}{2} \left(1 - \cos \frac{i-1}{k-1} \pi \right), \quad (1 \leq i \leq k) \quad (14)$$

여기서 k 는 격자의 분할수를 나타낸다.

수치해석에 있어서 시간간격(time step,)의 결정은 세심히 고려해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 이동 속도와 격자간격으로 조정되는 코란조건(Courant-Friedrichs-Lewy's law, 식(15)), 확산계수와 격자간격으로 구해지는 뉴만조건(Neumann's law, 식(16)) 그리고 유전완화시간(식(17))에 부합되도록 설정하였다.

$$\delta t \leq k \frac{\delta z}{\delta v_d}, \quad k < \frac{1}{2} \quad (15)$$

$$\delta t \leq \frac{\delta z^2}{2D} \quad (16)$$

$$\delta t \leq \frac{\epsilon_0}{e(\mu_e n_e + \mu_p n_p)} \quad (17)$$

2.3 2차원 모델링

2차원 모델링은 GEC(Gaseous Electronics Conference cell) 구조로 형성하였다(그림2 참조). 챔버는 폭 및 반경이 10[cm]로 구성되어 있으며, 구동 전극면에는 접지 가드링이 둘러싸여 있다. 본 모델

링은 Overzet 와 Hopkins의 Ar 플라즈마 밀도분포 측정조건과 일치되도록 하였다[15].

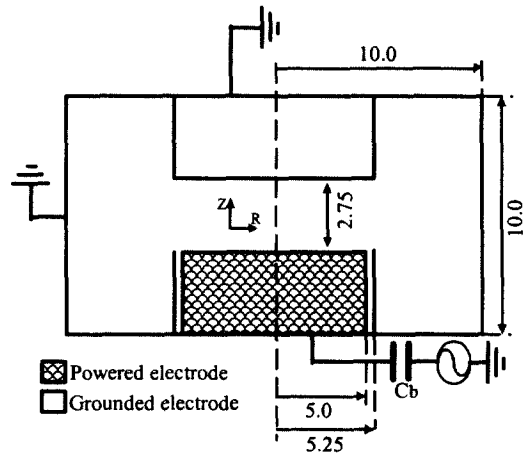


그림 2. 모의실험장치의 구조(Ar 가스압 : 100m Torr, 전원전압 : 120V, 결합콘덴서 : 40pF , rf 주파수 : 13.56MHz).

Fig. 2. Structure of the Simulation device(Ar gas pressure : 100m Torr, Applied source : 120V, Coupling condenser : 40pF , rf Frequency : 13.56MHz).

회로 모델링은 전극에 직렬로 콘덴서를 결합한 1차원 모델링과 동일하게 설정하였으며, 반경방향(R방향)으로 대칭축을 형성한다. 격자 간격은 축방향 및 반경방향 41×41로 설정하였다.

연속방정식 및 전자 에너지 보존식(식(1)과 (2))은 이동도와 확산속도에 의한 이산화계산 처리법(Schfetter-Gummel Method)으로 해석하였으며, 포아송 방정식은 축차과대완화법(SOR)으로 계산하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 1차원 시뮬레이션

그림3은 인가전압 120 [V], 압력 100 [mTorr]의 1차원 유체모델하에서 형성되는 정상상태의 전자(e) 정이온(Ar⁺), 전극간 전계(E) 및 포텐셜(V)의 시·공간분포를 보여주고 있다.

플라즈마 프로세스는 벌크영역(전극간의 중간 영역)에서 전기적으로 중성으로, 전자 및 이온의 밀도차가 거의 존재하지 않으며 따라서 전계도 거의 제

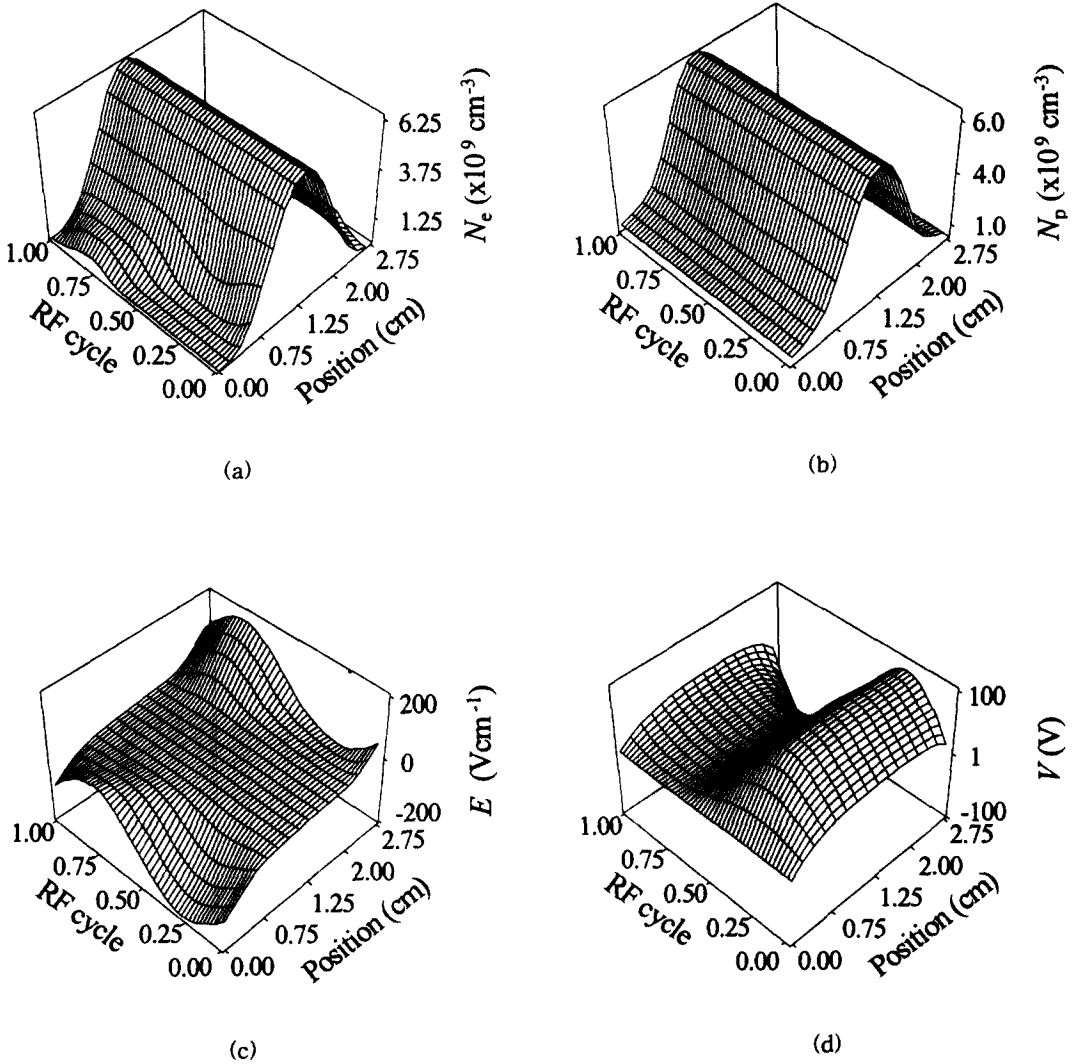


그림 3. 주기적 정상상태 측면 (a)전자밀도(N_e), (b)양이온밀도(N_p), (c)전계(E)와 (d)전위차(V).
 Fig. 3. Periodic steady-state profiles: (a) electron density (N_e), (b) positive ion density (N_p), (c) electric field (E) and (d) electric potential (V).

로에 가깝게 형성된다. 그러나 Sheath영역(전극 부근)에서는 전계가 크게 형성됨으로써, 상대적으로 질량이 적고 작은 입자인 전자는 이온보다 빠르게 변화하며, 전계의 변화속도에 신속한 움직임으로 응답하기 때문에 그림3 (a)와 같이 Sheath영역에서 시간 변화에 대응하는 특성을 나타내고 있다. 그러나 Ar^+ 이온은 전자에 비해 입자가 크며, 전계의 변화속도에 대응하지 못할 정도로 큰 질량을 가진 입자이므로 rf 1 cycle의 시간 변화에 대해 거의 일정한 패턴을 보여주고 있다. 따라서, Sheath영역의 큰 공간전

계를 이용하여, 반도체 표면의 증착 및 에칭을 효과적으로 처리할 수 있다.

이온밀도와 전자밀도는 벌크영역에서 거의 비슷하게 분포하는 전기적 준 중성(quasi-neutral) 상태를 형성하지만, sheath영역에서는 전자보다 높은 이온 밀도를 형성한다(그림3 (c)). 그림 4에 전극간 전압(V_a), 전류(I_a) 및 변위전류(I_d), 그리고 전 회로를 통과하는 총 전류(I_t)의 1주기변화를 보여주고 있다. 전원전극 및 접지전극의 면적이 같은 이유로 양 전극에 대해 대칭적인 밀도분포 및 전압, 전류분포를 보여주고 있다. 그림4로부터 전극간에 소모되는 방

전 전력은 0.8[W]로 계산되어진다.

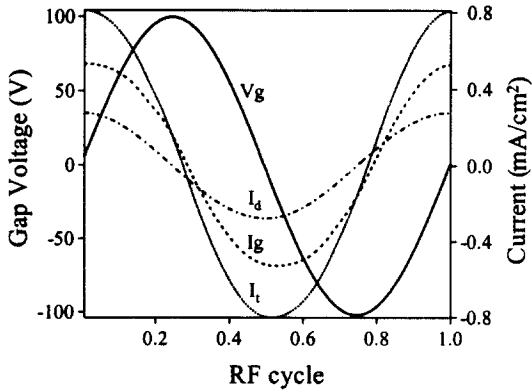


그림 4. V_g , I_g , I_d , I_t 의 시간적변화.

Fig. 4. Time variation of the gap potential V_g , the discharge current I_g , the displacement current I_d and total current I_t .

1차원 유체 모델링을 채용함으로써, 시간변화에 대한 공간전계 및 플라즈마를 형성하는 각 하전입자의 특성을 이해할 수 있으며, 시뮬레이션의 계산비용 면에서도 상당히 효과적이라고 할 수 있다. 또한 플라즈마의 선택성, 재현성과 안정성을 유지하고, 이온의 에너지와 운동방향을 정확하게 제어하여 기관에 수직 입사하는 우수한 이방성과 선택성을 가진 플라즈마가 요구되어지는 시점에서, 수치해석을 통한 제어 기술 및 반도체 디바이스의 고성능화, 고속화, 고집적화를 위해 중요한 연구로 판단된다.

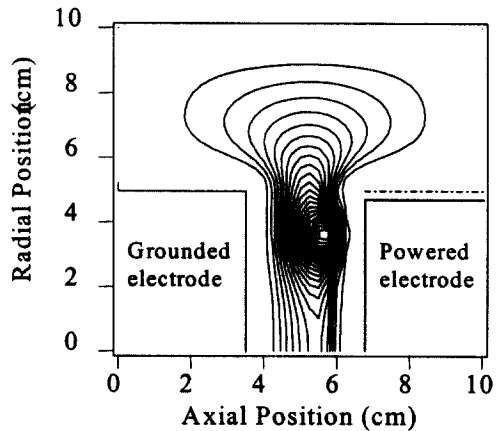
3.2 2차원 시뮬레이션

2차원 유체모델링에서는 그림 2와 같이 축방향으로 대칭적인 원통형 방전기구를 시뮬레이션으로 실현하였다. 외부회로 및 인가전력은 1차원 모델링과 동일하게 설정하였다. 1차원 모델링의 경우, 평행판 전극의 반경방향의 밀도분포는 축방향과 동일하다는 가정하에 계산하였다. 그러나, 2차원 모델링의 경우는 반경방향 및 축방향으로의 하전입자 움직임을 시뮬레이션하였다.

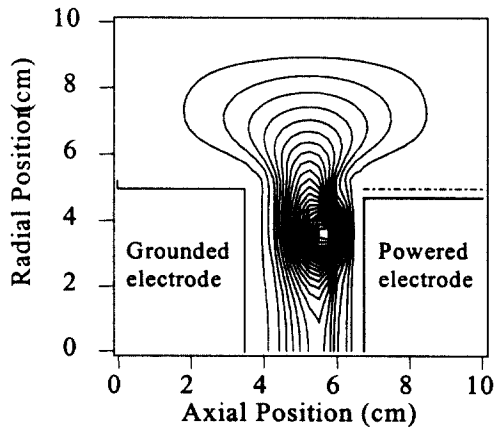
그림5는 주기적으로 안정된 정상상태의 전자(e), 정이온(Ar^+), 전극간 전계(E) 및 포텐셜(V)의 시간 평균한 공간분포를 보여주고 있다. 전자 및 이온의 각 등고선은 최대치($2.2E9\text{ cm}^{-3}$)를 $1.0E8$ 의 간격으로 20등분한 그래프이며, 포텐셜은 최대치 36 [V]를 4 [V]단위로 20등분한 그래프이다. 또한 구동전극면 위에 가드링을 설치하여 전계가 양 전극면 상에 형성할 수 있도록 하였다.

그림5로부터, RF 플라즈마의 축방향으로 비대칭 구조(off-axis maximum)를 형성하고 있음을 알 수 있으며, 이것은 구동전극 부근에서 훨씬 높은 공간전계 및 에너지가 형성되기 때문이다. 즉, 구동전극 면적과 접지전극의 면적(접지전극 + 챔버 접지면적)이 동일하지 않기 때문에 형성되는 dc 자기 바이어스(dc self-bias : -48 [V])의 원인으로 해석된다. 이 부분이 양 전극면적이 동일한 1차원 모델링의 결과와 대조적이다.

구동전극을 둘러싸는 가드링의 효과로 전계는 양 전극 방향으로 주로 형성되며, 확산과정을 통하여 반경방향으로 하전입자 밀도가 진전하는 것을 확인

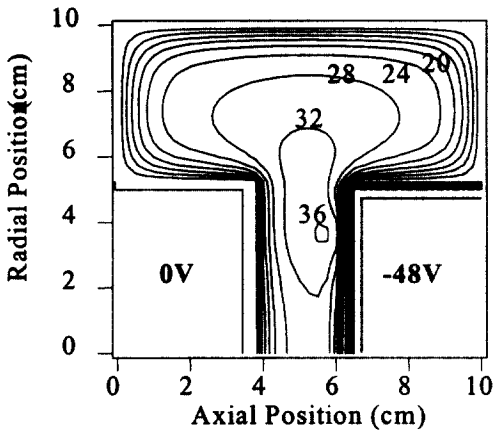


(a)

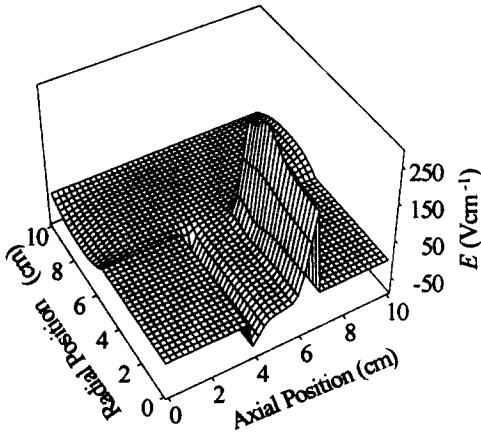


(b)

부터 1 [cm] 이내에 존재하는 것을 확인할 수 있다.



(c)



(d)

그림 5. 시간평균한 공간분포 (a)전자수밀도 (b)양이온수밀도 Vrf 120[V], 압력 =100[mTorr]에서 (c) 전위차와 (d)전계.

Fig. 5. Contours of time-averaged (a) electron number density, (b) positive ion(Ar⁺) number density, (c) electric potential and (d) electric field at Vrf = 120 [V], pressure = 100 [mTorr].

할 수 있다. 그림6에 100 [mTorr]의 압력하에 Overzet와 Hopkins의 실험 측정결과와 모델링의 결과를 비교하여 보았다. 하전입자 밀도의 절대치는 다소 오차가 있지만 밀도의 분포패턴은 전반적으로 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 실험치에서 밀도의 최대치 분포는 반경방향 전극의 가장자리로

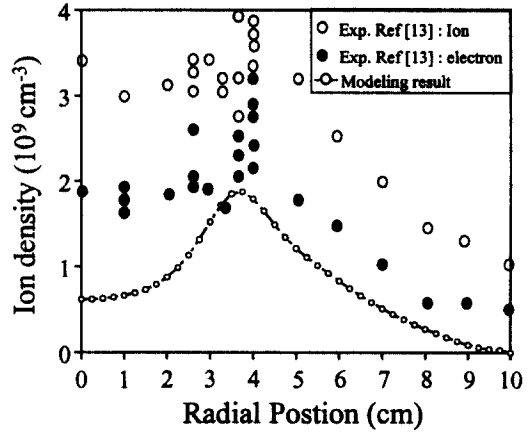


그림 6. Overzet와 Hopkins의 실험측정결과와 모델링 결과의 비교.

Fig. 6. Comparisons of the modelling result.

그림7에는 챔버의 중앙부분(R=0 [cm])인 위치에서 전극간의 거리(접지전극 : 3.5 [cm], 구동전극 : 6.25 [cm])에 대한 전자 및 이온밀도의 계산결과를 나타내었다. 주기적으로 평균한 전형적인 비대칭 2차원 플라즈마 구조를 나타내고 있다.



그림 7. 축의 위치(R=0cm)에 따른 접지전극(3.5cm)과 구동전극(6.25cm)에 따른 전극 사이의 전자와 이온 밀도의 변화.

Fig. 7. Spatial variation of the electron and ion densities between the powered and grounded electrodes along the axial position(R=0 [cm]).

4. 결 론

Ar RF 비평형 플라즈마의 특성을 1차원 및 2차원 유체 모델링을 통하여 분석하였다.

플라즈마의 특징으로서, 벌크영역에서 전기적으로 중성의 경향을 나타내며 하전입자간의 밀도차가 거의 존재하지 않으므로 공간전계도 매우 낮게 형성된다. 그러나 Sheath영역에서는 하전입자가 빠르게 운동하며, 공간전계 또한 크게 형성된다. 상대적으로 질량이 가볍고 작은 입자인 전자는 이온보다 빠르게 RF 전계 변화에 신속히 대응하며, 이온은 시간변화에 대한 응답속도가 매우 느리다.

1차원 유체 모델링을 채용함으로써, 플라즈마를 형성하는 각 하전입자의 특성을 이해할 수 있으며, 플라즈마의 선택성, 재현성과 안정성을 유지하고, 이온의 에너지와 운동방향을 제어함으로써, 반도체 디바이스의 고성능화, 고속화, 고집적화를 위한 중요한 연구로 생각되어진다.

2차원 유체 모델링을 채용하여, dc 자기 바이어스 및 가드링의 영향으로 축방향으로 비대칭구조를 형성하고 있음을 확인하였고, dc 자기 바이어스는 -48 [V]정도였다. 또한 가드링이 존재함으로써, 전계는 양 전극 방향으로 주로 형성되며, 하전입자의 최대치가 양 전극 사이에 형성되는 것을 확인하였고, 확산과정을 통하여 반경방향으로 하전입자 밀도가 진전하는 것을 확인할 수 있다.

2차원 플라즈마 모델링의 결과는 GEC 규격에 측정되어진 Overzet와 Hopkins의 밀도분포 측정결과와 유사함을 확인하였다.

그러나 이러한 모델링의 유효성을 입증하기 위해 더 많은 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] S. Samukawa, Appl. Phys. Lett. 64, 3398, 1994.
- [2] M. Meyyappan, J. Vac. Sci. Technol. A14, 2122, 1996.
- [3] A.L. Ward, Phys. Rev. A. 112, 1852, 1958.
- [4] A.L. Ward, J. Appl. Phys. 33, 2789, 1962.
- [5] 최충석, 박복기, 정해덕, 이덕출, "플라즈마 중합법에 의한 방향족 유기박막의 제조와 광학상수 결정", 전기전자재료학회지, 6권 5호, pp.428-434, 1993.
- [6] 신중홍, 고태언, 김두환, 박정후, "플라즈마 파라메타 측정용 Langmuir 구동회로 실현 및 적용", 전기재료학회지, 9권 5호, pp.506-510, 1996.
- [7] 김창석, 하충기, 김병인, "RF Sputtering으로 제작된 SiO₂ 및 SiO₂/TiN 박막의 R-V 특성", 전기전자재료학회논문지, 11권 10호, pp.826-831, 1998.
- [8] D.B. Graves and K.F. Jensen, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-14, 78, 1986.
- [9] J.P. Boeuf, Phys. Rev. A 36, 2782, 1987.
- [10] D.B. Graves, J. Appl. Phys. 62, 88, 1987.
- [11] V. Vahedi, C.K. Birdsall, M.A. Lieberman, G. DiPeso, and T.D. Rogilien, Phys. Fluids B 5, 2719, 1993.
- [12] E. Gogolides and H.H. Sawin, J. Appl. Phys. 72, 3971, 1992.
- [13] S.K. Dhali and P.F. Williams, J. Appl. Phys. 62, 4696, 1987.
- [14] Y-H. Oh, N-H. Choi and D-I. Choi, J. Appl. Phys. 67, 3264, 1990.
- [15] L.J. Overzet and M.B. Hopkins, J. Appl. Phys. Lett. 63, 2484, 1993.