

유체시뮬레이션을 통한 Ar/CF₄ 자화유도결합 플라즈마의 특성 연구

A study on Ar/CF₄ Magnetized Inductively Coupled Plasma Using Fluid Simulation

김 윤 기* · 손 의 정* · 위 성 석* · 김 동 현* · 이 호 준†
 (Yun-Gi Kim · Eui-Jeong Son · Sung-Suk Wi · Dong-Hyun Kim · Ho-Jun Lee)

Abstract - The self-consistent simulation based on the drift-diffusion approximation with anisotropic transport coefficients was performed. The RHCP-wave propagation was observed in MICP and this wave was refracted toward the high-density region. The calculated impedance seen from the antenna terminal shows that resistance component of MICP is a higher than that of ordinary ICP. Because of a higher resistance, the power transfer efficiency was improved to 95%. This property is practically important for large-size, low-pressure plasma sources because high resistance corresponds to high power-transfer efficiency and stable impedance matching characteristics.

Key Words : Inductively Coupled Plasma, Ar/CF₄ Plasma, Fluid Simulation

1. 서 론

반도체 공정에서 유도결합 플라즈마는 다양한 분야에 응용되고 있다. 그 중 건식 식각 공정은 나노미터 수준의 미세 가공을 가능하게 하여 그 중요성이 커지고 있다. 최근 반도체 소자의 생산성 향상 및 비용 감소를 위해 450[mm] 크기의 대면적 wafer 제조 공정을 위한 장치 개발이 요구되고 있다[1]. 이러한 반도체 제조용 대면적 플라즈마 장치에 요구되는 특성은 균일하고 높은 밀도의 플라즈마를 생성할 수 있어야 하며 높은 전력 전달 효율을 가져야 한다. 반도체 소자의 제작에 있어서 배선의 절연이나 층간 절연에 가장 많이 이용되는 유전체 재료로는 실리콘 산화막이 있다. 이를 식각하는 물질로는 CF₄나 C₄F₈과 같은 Fluorocarbon 계열의 Gas를 사용한 플라즈마가 이용된다. 저압 고밀도 유도결합 플라즈마에서 CF₄ Gas를 이용하는 경우 다양한 종류의 활성종 및 이온이 발생한다. 실험적으로 측정하는 다양한 방법이 존재하지만 측정과 분석에 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 유체시뮬레이션을 통해 이러한 활성종 및 이온의 발생을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 Ar 기반의 Gas에 CF₄를 5% 희석한 상태에서 자장의 변화에 따라 식각 공정에 많은 영향을 미치는 전자온도, 밀도, 플라즈마 전위 및 각각의 활성종 및 이온의 밀도 분포를 기체 유속 방정식을 결합하여 계산을 수행하였다. 이 때 챔버 내부의 압력은 5[mTorr]이며 입력 power는

1000[W]로 고정하였으며, 입력 유속은 100[sccm], 내부 압력은 5[mTorr]를 유지하였다.

2. 시뮬레이션 구성 및 방법

그림 1은 유도결합 시뮬레이션에 적용된 챔버 개략도이다. 챔버의 반경은 270[mm], 높이는 360[mm]이며, 두께 25[mm]의 RF 윈도우가 챔버 윗면에 위치한다. 2-turn 나선형의 안테나는 RF 윈도우에서 10[mm] 떨어진 지점에 위치시켰으며, 내경 160[mm], 외경 240[mm]이다. 챔버의 중앙 하단에는 높이 168[mm], 직경 306[mm]의 wafer chuck이 위치하며, RF 윈도우 하단에 가스 주입구가 설정되어있다. 실제 식각 공정에 적용되는 가스 주입구 위치와 유사하게 설정하였다. 그리고 wafer

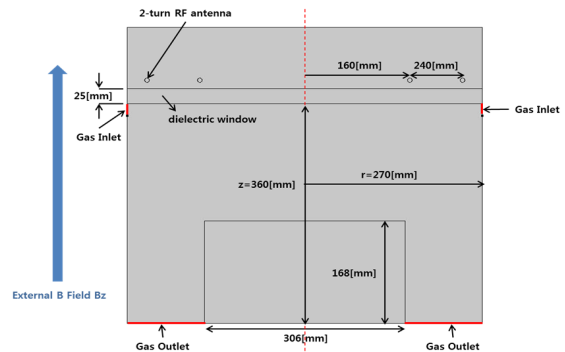


그림 1 유도결합 플라즈마 시뮬레이션에 적용된 챔버개략도
 Fig. 1 schematic diagram of Applied to inductively coupled plasma simulation

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.

E-mail: hedo@pusan.ac.kr

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.

Received : January 28, 2015; Accepted : March 27, 2015

chuck을 제외한 챔버 바닥면을 가스 배출구로 설정하였다.

본 시뮬레이션에서 가스 주입구의 경계조건은 mass flow로 설정하였고, 100[sccm]이 챔버 내로 주입되게 하였다. 가스 배출구의 경계 조건은 챔버 내의 압력을 일정하게 유지시킬 수 있는 압력조건으로 설정하였다. 플라즈마 영역 이외의 영역에 대한 매질 조건은 표1과 같다. 또한 전자의 이동도를 계산하기 위해 BOSIG+를 이용하여 각 압력 및 CF₄비율에 대한 충돌 주파수를 전자 평균 에너지에 대한 함수로 구하였으며, 총 122가지의 Ar/CF₄ 화학반응식 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다[2,3]~[13].

표 1 플라즈마 영역 외 매질 조건

Table 1 The medium condition outside plasma region

	전기전도도(σ) [S/m]	비유전율(ϵ_r)	비투자율(μ_r)
안테나	6×10^7	1	1
RF 원도우	0	4.2	1
안테나 외부	0	1	1

유도결합 및 자화유도결합 플라즈마의 시뮬레이션을 위해 사용된 방정식은 안테나에 흐르는 전류로 유도되는 전계 계산을 위한 Maxwell 방정식과 Poisson 방정식, 플라즈마 내의 입자 변화를 계산하기 위한 연속 방정식 및 에너지 보존 방정식, 챔버 내에서의 기체 유동을 계산하기 위한 Navier-Stokes 방정식 등이 적용되었다[14,15].

유도결합 플라즈마는 안테나 흐르는 시변 전류에 의해 발생하는 시변 전계를 유도하여 전력 전달이 이루어진다. Ampere 법칙과 Faraday 유도 법칙 그리고 벡터 자기퍼텐셜 \vec{A} 를 통해 다음과 같이 정의된다

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu_0 \vec{J}_e - j\omega \mu_0 \sigma \vec{A} \quad (1)$$

\vec{J}_e 는 안테나에 흐르는 전류이며, 변위 전류는 무시한다. 우변의 두 번째 항은 플라즈마에 유도되는 전류성분이다. 자화유도결합 플라즈마의 경우 플라즈마의 전도도는 아래의 식과 같이 텐서 형태로 표현된다.

$$\vec{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{\perp} & -\sigma_{\times} & 0 \\ \sigma_{\times} & \sigma_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\parallel} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{ne^2}{m_e} \frac{\nu_m + j\omega}{(\nu_m + j\omega)^2 + \omega_{ce}^2}$$

$$\sigma_{\times} = \frac{ne^2}{m_e} \frac{\omega_{ce}}{(\nu_m + j\omega)^2 + \omega_{ce}^2}$$

$$\sigma_{\parallel} = \frac{ne^2}{m_e} \frac{1}{\nu_m + j\omega}$$

ν_m 과 ω_{ce} 는 각각 전자-중성 입자 충돌 주파수와 전자 사이클

로트론 주파수를 나타낸다. 전자-중성 입자 충돌 주파수는 입자의 충돌 단면적을 이용하여 two-term approximation Boltzmann 방정식을 이용하여 구한다. 이때 BOLSIG+를 이용하였다[16]. 전도 텐서($\vec{\sigma}$)의 비대각 성분에 의해 많은 양의 Hall 전류 \vec{J}_r 이 유도된다. 플라즈마 내 전자로의 전력 전달식은 다음과 같으며, 전자 에너지 보존 방정식에 사용된다.

$$P_{abs} = \frac{1}{2} R_e (E_r \cdot \vec{J}_r^* + E_{\phi} \cdot \vec{J}_{\phi}^*) \quad (2)$$

$$\int_{plasma} P_{abs} dv + \frac{1}{2} R_e \int_{antenna} (J_e \cdot E_{\phi}^*) dv = 0 \quad (3)$$

안테나의 임피던스 특성은 안테나에 유도되는 전압과 전류에 의해 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$Z_{terminal} = \frac{\oint_{antenna} E_{\phi} r d\phi}{I_e} \quad (4)$$

임피던스 특성은 임피던스 매칭 회로 설계 시 유용한 요소이고 전력 전달 효율을 측정하는데 유용하다. 플라즈마 내의 전자 및 이온은 다음의 연속 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial n_{e,i}}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_{e,i} = k_i n_g n_{e,i} \quad (5)$$

n_e 와 n_i 는 전자와 이온 밀도이고, Γ_e 와 Γ_i 는 전자와 이온의 선속이며, 이는 drift-diffusion 근사를 따른다. n_g 는 중성기체 입자 밀도, k_i 는 하전 입자와 중성기체 입자와의 반응계수를 나타내며, 하전 입자의 선속은 다음의 drift-diffusion 근사식으로 정의된다.

$$\Gamma_e = -\vec{\mu}_e n_e \vec{E} - \vec{D}_e \nabla n_e \quad (6)$$

$$\Gamma_i = -\vec{\mu}_i n_i \vec{E} - D_i \nabla n_i \quad (7)$$

외부 축방향 자장(B_z)이 존재하는 경우 플라즈마 내의 전자 운동은 자장의 영향을 받아 이동도 및 확산계수가 텐서 형태로 나타난다. 전자의 이동도는 다음과 같다.

$$\vec{\mu}_e^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu_{dc}} - B_z & 0 \\ B_z & \frac{1}{\mu_{dc}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{dc}} \end{pmatrix}$$

$$\mu_{dc} = \frac{e}{m_e \nu_m}$$

본 연구에서 사용된 COMSOL에서는 전자 이동도의 역수 형태

를 입력 값으로 취한다. 이는 외부 자장이 존재하는 경우 전자의 이동을 간단한 형태로 표현하기 위함이다. μ_{de} 는 자장이 없는 경우 전자의 이동도이다. 전자의 확산계수는 Einstein relation에 의해 계산된다.

$$\overrightarrow{D}_e = \frac{kT_e}{e} \overrightarrow{\mu}_e \quad (8)$$

이온의 이동도는 표 2와 같다. 표2에 나타난 이동도는 Ar 이온의 경우 760[Torr], 기타 이온은 1[Torr] 기준으로 정해진 값이다. 이동도는 압력에 반비례한다는 가정 하에 각각의 시뮬레이션 압력 조건을 맞추어 환산하여 계산을 수행하였다.

표 2 이온의 이동도

Table 2 The Mobility of Ions

No.	Species	μ [cm ² /(V·s)]	Pressure [Torr]	Ref.
1	Ar ⁺	1.53	760	[2]
2	CF ₃ ⁺	7.60 × 10 ²	1	[17]
3	CF ₂ ⁺	1.05 × 10 ³	1	[17]
4	CF ⁺	1.69 × 10 ³	1	[17]
5	C ⁺	4.37 × 10 ³	1	[17]
6	F ⁺	7.60 × 10 ²	1	[17]
7	F ₂ ⁺	3.80 × 10 ²	1	[17]
8	CF ₃ ⁻	3.14 × 10 ²	1	[17]
9	F ⁻	1.14 × 10 ³	1	[17]

중성 입자의 확산 계수는 Lennard-Jones approximation에 의해 구해지며 기타 중성 입자들의 연속 방정식은 다음과 같다 [15,18,19].

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (w_k) + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) w_k = \nabla \cdot \vec{j}_k + R_k \quad (9)$$

위 식에서 j_k 는 확산 선속 벡터, R_k 는 k입자의 반응 계수 [kg/(m³·s)], \vec{u} 는 질량 평균 유체 속도 벡터[m/s], ρ 는 혼합가스의 밀도[(kg/m³)], w_k 는 k입자의 질량비를 나타내며, 전자에너지 보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e + \vec{E} \cdot \Gamma_e = R_e - (\vec{u} \cdot \nabla) n_e \quad (10)$$

$$\Gamma_e = -(\vec{\mu}_e \cdot \vec{E}) n_e - \overrightarrow{D}_e \cdot \nabla n_e \quad (11)$$

n_e 는 전자 에너지 밀도[V/m³]이고, R_e 는 비탄성 충돌에 의해 잃거나 얻는 에너지[V/(m³·s)], $\vec{\mu}_e$ 는 전자에너지 이동도 [m²/(V·s)], \vec{E} 는 전계[V/m], \overrightarrow{D}_e 는 전자 에너지 확산 계수 [m²/s]이다. 그리고 ε 은 전자 에너지를 뜻한다. 전자 에너지 이동도와 전자 에너지 확산 계수는 전자 이동도와 다음과 같은 관

계를 갖는다.

$$\overrightarrow{\mu}_e = \frac{3}{5} \mu_e \quad \overrightarrow{D}_e = \overrightarrow{\mu}_e T_e \quad (12)$$

전자의 평균 에너지 $\bar{\varepsilon}$ [eV]는 전자 밀도 및 전자 에너지 밀도와 다음의 관계를 갖는다.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{n_e}{n_e} \quad (13)$$

표 3는 입자의 Lennard-Jones 변수를 정리한 표이다.

표 3 입자의 Lennard-Jones 변수

Table 3 The Lennard-Jones parameter of particle

No.	Species	Molecular weight [kg/mol]	Lennard Jones	
			radius σ [Å]	energy ε [K]
1	Ar	0.04	3.33	136.5
2	CF	0.031	3.635	94.2
3	CF ₂	0.05	3.977	108
4	CF ₃	0.069	4.320	121
5	CF ₄	0.088	4.662	134
6	C	0.012	3.298	71.4
7	F	0.019	2.97	112.6
8	F ₂	0.038	3.357	112.6

전자 온도는 전자 평균 에너지에 의해 구해진다.

$$T_e = \frac{2}{3} \bar{\varepsilon} \quad (14)$$

챔버 벽면에서 입자의 경계조건은 다음과 같다. 벽면이 외부 자장과 수평인 벽면의 경우 전자의 선속

$$\Gamma_{en} = n_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \quad (15)$$

벽면이 외부 자장과 수직인 경우 전자의 선속

$$\Gamma_{en} = n_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \left(\frac{v_m^2}{v_m^2 + u_{ce}^2} \right) \quad (16)$$

벽면으로의 이온 선속

$$\Gamma_{in} = n_i \mu_i E_n \quad (17)$$

플라즈마 전위를 구하기 위한 Poisson 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (-\epsilon_0 \nabla V) = e(n_i - n_e) \quad (18)$$

벽면에서의 전위 V 는 0인 경계조건을 만족한다.

챔버 내의 기체 유동 계산을 위한 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} \quad (19)$$

\vec{u} 는 기체의 속도, \vec{F} 는 단위 체적당 걸리는 외력, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν 는 점성 계수이며, 벽면에서의 속도 $\vec{u}=0$ 의 경계 조건을 만족한다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 Ar 기반의 Gas에 CF₄를 5% 희석한 상태에서 외부 자장의 변화에 따른 전계 분포 결과이다. 챔버 내부의 압력은 5[mTorr]이며 입력 power는 1000[W]로 고정하였다. 외부 자장이 인가됨에 따라 플라즈마 내부로 파장이 여기 되는 것을 확인할 수 있으며, 자장의 세기가 9[Gauss] 이상인 경우 파장의 굴절이 챔버 중심부로 심하게 이루어진다. CF₄가 첨가되면 플라즈마 내부에 다양한 종류의 이온이 발생하게 되며, 특히 F⁻나 CF₃⁻와 같은 음이온이 다량으로 발생하여 파장 전파에 영향을 주는 것으로 보여진다. 이러한 전계 분포는 전자 밀도 및 전자 온도 분포에 큰 영향을 미친다.

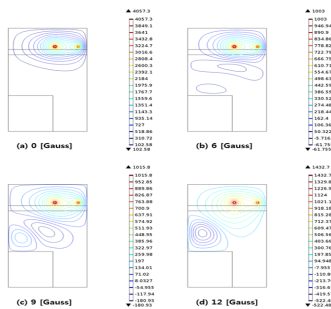


그림 2 외부 자장에 따른 플라즈마의 전계 분포
Fig. 2 The electric field distribution of plasma according to external magnetic field

그림 3은 외부 자장에 따른 전자 온도 분포이다. 그림 2의 전계분포에서 보여 지듯이 자장의 세기가 증가할수록 챔버 중앙부로 굴절되는 파장의 세기가 커져 전자의 가열이 높아진다. 따라서 전자 온도의 최고점이 나타나는 영역이 자장의 세기에 따라 챔버 중앙부로 이동하게 된다. 외부 자장이 존재하는 경우 열전도도의 비등방성 특성에 의해 전자 온도 구배가 커진다. 그림 4의 플라즈마 전위는 전자 온도가 높은 영역에서 증가한다. 외부 자장이 인가됨에 따라 플라즈마 전위는 외부 자장이 없는 경우에 비해 낮아진다.

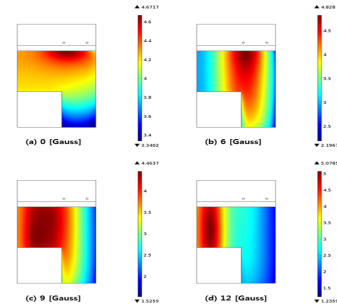


그림 3 외부 자장에 따른 전자 온도 분포
Fig. 3 The distribution of electron temperature according to external magnetic field

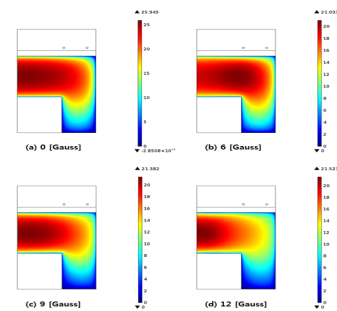


그림 4 외부 자장에 따른 플라즈마 전위 분포
Fig. 4 The distribution of plasma potential according to external magnetic field

그림 5는 외부 자장에 따른 중성 입자의 밀도 변화를 나타낸 것이다. 자장이 인가됨에 따라 CF₄의 밀도는 약간 감소한다. 자장에 의한 전자 온도 증가로 인해 전자 충돌로 인한 CF₄의 해리 및 이온화율이 증가하기 때문이다. 그러나 9[Gauss] 이상의 자장에서는 CF₄의 밀도가 작은 양이지만 증가하였다. Ar/CF₄ 플라즈마에서 가장 많이 발생하는 중성 입자는 F원자이다. 자장이 없는 경우 F와 CF₃의 양이 거의 비슷하지만, 자장이 증가함에 따라 CF₃의 양이 감소하였다. 이는 CF₄와 마찬가지로 높은 에너지의 전자에 의해 CF₃의 해리 및 이온화가 진행되었음을 의미한다. 자장이 없는 경우 중성 입자 밀도의 순서는 CF₂, CF, C, F₂이다. 그러나 자장이 증가함에 따라 C원자의 밀도가 증가하여 9[Gauss] 이상이 되면 C의 양이 크게 증가하여 C, CF₂, CF, F₂의 순서가 된다. 또한 F원자의 증가와 같은 원인으로 C원자 또한 증가하는 것으로 보여진다. SiO₂와 달리 Si 식각과정에서 탄소가 식각에 참여할 수 없기 때문에 표면에 탄소 또는 불화탄소 계열의 화학종들이 누적되려는 경향이 있다. 이는 식각 선택도를 얻는 중요한 채널이 된다. 선택도를 증가시키기 위해서는 플라즈마 체적내의 불소 농도를 탄소 또는 불화탄소 계열의 중성 입자에 비해 감소시킬 필요가 있다[20]. 따라서 자화유도결합 플라즈마는 탄소의 증가율이 불소의 증가율보다 높아 실리콘 식각 시 선택도를 높일 수 있을 것으로 보여진다.

그림 6은 챔버 내 가스 흐름의 속도 분포를 보여준다. RF

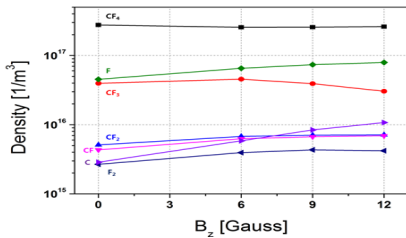


그림 5 외부 자장에 따른 중성 입자 밀도
 Fig. 5 The density of neutral particle according to external magnetic field

Window 하단에서 주입된 Gas는 wafer chuck 옆으로 빠져 나간다. 챔버 중앙부의 속도는 비교적 낮아 유체의 흐름에 의한 영향이 작아 보이지만, 벽면으로 향할수록 Gas의 속도가 증가하여 플라즈마에 의해 생성되는 중성입자들의 속도에 많은 영향을 받았다. 특히 비교적 무거운 입자인 CF₃와 CF₂의 밀도의 경우 가스 속도 분포와 비슷한 경향을 나타냈으며, 가벼운 CF, F, C, F₂ 입자들은 확산에 의한 분포가 지배적인 것을 확인하였다.

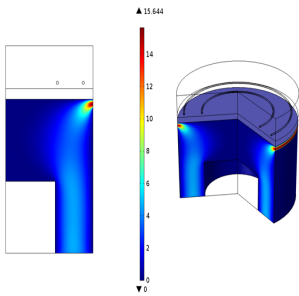


그림 6 챔버 내부의 가스 속도 분포
 Fig. 6 The distribution of gas velocity inside chamber

그림 7은 외부 자장에 따른 하전 입자의 밀도 변화를 나타낸 것이다. 전자 밀도의 양이 가장 많으며 Ar⁺와 유사한 수치를 갖는다. 이온의 밀도는 CF₃⁺, F⁻, CF₂⁺, CF⁺의 순서로 나타난다. CF₂⁺, CF⁺는 자장의 세기가 증가함에 따라 밀도가 증가하였으나, CF₃⁺와 F⁻는 6[Gauss] 이후 감소하는 경향을 보였다. 이는 재결합율이 증가하여 이온 감소 및 CF₄의 밀도 증가가 발생하는 것으로 보여진다.

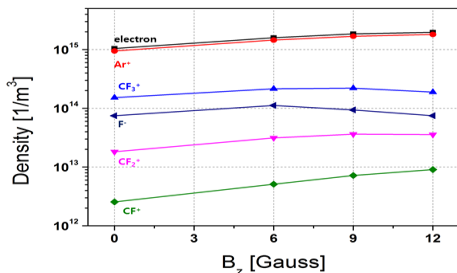


그림 7 외부 자장에 따른 하전 입자 밀도
 Fig. 7 The density of charged particle according to external magnetic field

그림 8와 그림 9는 외부 자장에 따른 Ar/CF₄ 플라즈마의 전자 밀도 분포 및 반경방향의 전자 확산 계수 계산 결과를 나타내고 있다. 외부 자장이 인가되는 경우 반경방향으로의 전자 확산 계수 감소로 인해 전자가 국부적으로 구속되는 현상이 나타난다. 이때의 전자 확산 계수의 값이 약 100배 이상 감소하는 것을 확인하였다.

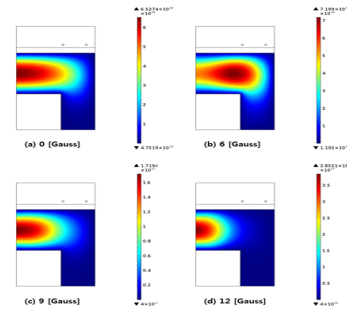


그림 8 외부 자장에 따른 전자 밀도 분포
 Fig. 8 The distribution of electron density according to external magnetic field

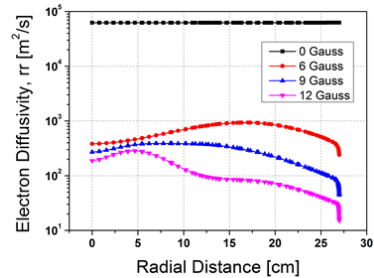


그림 9 외부 자장에 따른 반경 방향의 전자 확산 계수
 Fig. 9 The electron diffusion coefficient of radius direction according to external magnetic field

그림 10은 외부 자장에 따른 Ar/CF₄ 플라즈마의 임피던스 특성을 나타낸 결과이다. 외부 자장이 인가되는 경우 안테나 측에서 바라본 시스템의 저항 성분은 0.45[Ω]에서 7~8[Ω]으로 크게 증가하였으며, Stochastic Heating을 고려했을 시에도 조금 증가하는 경향을 나타내었다. 인덕턴스성분은 유사한 값을 나타내었다.

입력전력 1000[W] 기준에서 Q값($= \frac{\omega L}{R}$)을 계산 했을 시 외부 자장의 유무에 따라 각각 약 307.8, 18.5로 나타났으며, 외부 자장을 인가하지 않은 경우에 비해 17배 정도 감소하였다.

그림 11은 입력전력에 따른 효율을 나타낸 결과이다. 입력전력이 증가할수록 선형적으로 플라즈마에 소비되는 전력 및 안테나에서 소비되는 전력이 증가하였으며, 유도결합 플라즈마 경우에 비해 자화유도결합 플라즈마에서의 효율이 개선되는 것을 확인하였다.

따라서 자화유도결합 플라즈마는 대면적 식각공정에 적용 시 시스템의 Q값을 낮추어 임피던스 매칭 특성 개선 및 높은 전력

전달 효율 등 많은 장점을 나타낼 것으로 예상된다.

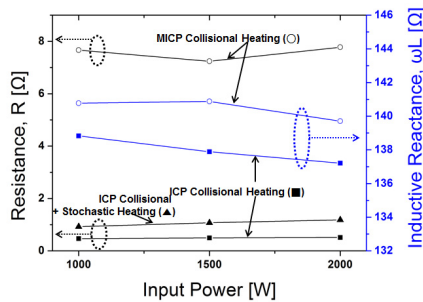


그림 10 외부 자장에 따른 임피던스 특성

Fig. 10 The impedance characteristic according to external magnetic field

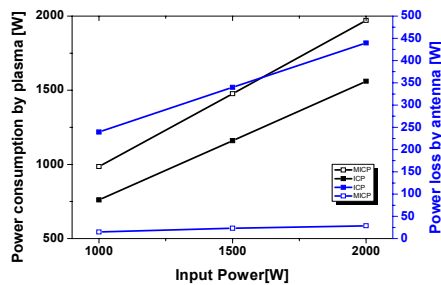


그림 11 입력전력에 따른 효율

Fig. 11 The efficiency according to input power

4. 결 론

본 연구에서는 Ar/CF₄ 플라즈마의 유체 시뮬레이션을 통하여 식각 공정에 많은 영향을 미치는 변수를 계산하고 그 결과를 비교분석하였다.

외부 자장에 증가 하였을 때 RHCP(Right Hand Circular Polarization)-wave에 의해 챔버 중심부로 파장이 굴절되는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 전계 방향과 동일하게 전자 온도가 높은 영역이 챔버 중심부로 이동하게 되며, 플라즈마 전위도 전자 온도가 높은 영역에서 증가하는 경향이 나타났다. 또한 외부 자장이 인가했을 때 플라즈마 전위는 외부 자장이 없는 경우에 비해 다소 낮아졌다. 전자 밀도 분포는 외부 자장을 증가함으로써 반경 방향으로의 전자 확산 계수 감소로 인해 전자가 국부적으로 챔버 중심부로 구속되는 경향이 나타났다.

그리고 중성 입자 밀도 분포는 Gas 주입구 부근의 CF₄ 해리율 감소로 인해 비교적 무거운 입자인 CF₃와 CF₂는 Flow에 많은 영향을 받아 Gas 주입구 부근의 밀도 분포가 낮았으며, 비교적 가벼운 CF, F, C, F₂ 입자는 확산에 의한 분포가 지배적으로 인해 챔버 중심부에서의 밀도 분포가 높았다. 또한 하전 입자 밀도 분포는 전자 밀도 분포와 동일한 경향이 나타나는 것을 확인하였다.

결론적으로 시뮬레이션 수행 결과 외부자장을 인가한 자화유도 플라즈마의 경우 유도결합 플라즈마의 경우에 비해 전력 전달 효율이 상승하는 결과를 얻을 수 있었다. 일반적으로 유도결합 플라즈마의 경우 약 70%의 효율을 보이지만, 자화유도결합 플라즈마의 경우 95%정도로 상승하였다. 이로 인하여 시스템의 저항 성분 증가와 인덕턴스 성분 감소로 부하의 Q값이 개선되었다. 이는 실험 중 임피던스 매칭의 정성적 개선을 뒷받침해준다. 이러한 결과로 자화유도결합 플라즈마는 유도결합 플라즈마의 특성을 개선하고 대면적 반도체 제조 공정에 적용될 가능성이 있음을 확인하였다.

감사의 글

“본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (No. 2013H1B8A2032267).”

References

- [1] Chen-Fu Chien, J.K. Wang, Tzu-Ching Chang, Wen-Chin Wu “Economic Analysis of 450mm Wafer Migration” IEEE, Semiconductor Manufacturing, 1-4 (2007)
- [2] Tables of Physical and Chemical Constants (16th edition) (1995).
2.1.4 Hygrometry, Kaye and Laby Online. Ver. 1.0 (2005) www.kayelaby.npl.co.uk
- [3] PHELPS database, <http://www.lxcat.laplace.univ-tlse.fr> (2013)
- [4] Michael A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg “Principles of Plasma Discharges and Materials Processing” John Wiley&Sons (2005)
- [5] Alex V. Vasenkov, Xi Li, Gottlieb S. Oehrlein, and Mark J. Kushner “Properties of c-C4F8 inductively coupled plasmas. II. Plasma chemistry and reaction mechanism for modeling of Ar/c-C4F8/O2 discharges” J. Vac. Sci. Technol, A22, 511 (2004)
- [6] Russell A. BONHAM “Electron Impact Cross Section Data for Carbon Tetrafluoride” Jpn. J. Appl. Phys, 33, 4157 (1994)
- [7] I. Rozum, P. Limão-Vieira, S. Eden, J. Tennyson, and N. J. Mason “Electron Interaction Cross Sections for CF₃I, C₂F₄, and CF_x (x=1 - 3) Radicals” J. Phys. Chem. Ref, 35, 267 (2006)
- [8] T. Kimura and K. Ohe “Model and probe measurements of inductively coupled CF₄ discharges” J. Appl. Phys, 92, 1780 (2002)

[9] V. Tarnovsky and K. Becker "Absolute partial cross sections for the parent ionization of the CF_x(x=1-3) free radicals by electron impact" J. Chem. Phys, 98, 7868 (1993)

[10] V. Tarnovsky, P. Kurunczi, D. Rogozhnikov, K. Becker "Absolute cross sections for the dissociative electron impact ionization of the CF_x(x = 1-3) free radicals" International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes, 128, 181 (1993)

[11] E. Meeks, R. S. Larson, S. R. Vosen and J. W. Shon "Modeling Chemical Downstream Etch Systems for NF₃/O₂ Mixtures" J. Electrochem. Soc, 144, 357 (1997)

[12] E. Brook, M F A Harrison and A C H Smith, "Measurements of the electron impact ionisation cross sections of He, C, O and N atoms" J. Phys. B: Atom. Molec. Phys, 11, 3115 (1978)

[13] J T Gudmundsson "Global model of plasma chemistry in a low-pressure O₂/F₂ discharge" J. Phys. D: Appl. Phys, 35, 328 (2002)

[14] Ho-Jun Lee, Yun-Gi Kim "Self-consistent simulation study on magnetized inductively coupled plasma for 450 mm semiconductor wafer processing" Thin Solid Films, 521, 78 - 82 (2012)

[15] Plasma Module User's Guide, COMSOL Multiphysics v4.3b (2013)

[16] G J M Hagelaar and L C Pitchford "Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models" Plasma Sources Sci. Technol, 14, 722 - 733 (2005)

[17] Soon-Youl So, Akinori Oda, Hirotake Sugawara and Yosuke Sakai "Transient behaviour of CF₄ rf plasmas after step changes of power source voltage" J. Phys. D: Appl. Phys, 34, 1919 (2001)

[18] Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell "THE PROPERTIES OF GASES AND LIQUIDS" McGRAW-HILL (2001)

[19] Roger A. Svehla "ESTIMATED VISCOSITIES AND THERMAL CONDUCTIVITIES OF GASES AT HIGH TEMPERATURES" NASA Technical Report, 132 (1962)

[20] Dennis M. Manos, Daniel L. Flamm "Plasma Etching: An Introduction" Academic press, San Diego (1989)

저 자 소 개



김 윤 기(Yun-Gi Kim)

1978년 2월 18일생. 2000년 부산대학교 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 공대 전기공학과 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(공학). 현재 SK 하이닉스 재직
Tel : 031-620-0597, Fax : 031-645-8098
E-mail : yungi96.kim@gmail.com



손 의 정(Eui-Jeong Son)

1986년 6월 2일생. 2005년 동의대학교 공대 전기공학과 졸업. 2012년 부산대학교 대학원 공대 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.
Tel : 051-510-1544, Fax : 051-510-1498
E-mail : vhxmwkd2@naver.com



위 성 석(Sung-Suk Wi)

1982년 5월 30일생. 2008년 한국해양대학교 공대 전기전자공학과 졸업. 2010년 부산대학교 대학원 공대 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.
Tel : 051-510-1544, Fax : 051-510-1498
E-mail : wss3@pusan.ac.kr



김 동 현(Dong-Hyun Kim)

1961년 1월 9일생. 1984년 부산대학교 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 부산대 학교 PDP연구소 연구원.
Tel : 051-510-1544, Fax : 051-510-1498
E-mail : dhkim11@pusan.ac.kr



이 호 준(Ho-Jun Lee)

1966년 10월 14일생. 1989년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학부과 졸업(공학). 현재 부산대학교 공대 전자전기컴퓨터공학과 정교수.
Tel : 051-510-2301, Fax : 051-513-0212
E-mail : hedo@pusan.ac.kr