

고밀도 플라즈마 발생장치 2차원 모델링

이상덕 · 신치범[†] · Stas Berezhnoj^{*}

아주대학교 화학공학과

^{*}Physical Technical Dept., St. Petersburg State Technical University

(2000년 2월 22일 접수, 2000년 11월 8일 채택)

Two-Dimensional Modeling of High-Density Plasma Source

Sang Duk Lee, Chee Burm Shin[†] and Stas Berezhnoj^{*}

Dept. of Chem. Eng., Ajou University

^{*}Physical Technical Dept., St. Petersburg State Technical University

(Received 22 February 2000; accepted 8 November 2000)

요 약

고밀도 플라즈마 발생장치의 해석을 위하여 2차원 유체 모델링을 수행하였다. 모델에서는 플라즈마 전달현상, 중성입자 동력학, 기체 유동, 열전달 및 외부로부터 공급되는 동력의 영향이 모두 포함되었다. 다성분계의 전달 현상에 대한 지배방정식은 유도 결합 동력의 분포를 구하기 위한 Maxwell 방정식과 연립하여 해를 구하였다. 이 모델을 헬리컬 공진기 염소 플라즈마 발생장치에 적용하여 반응기 압력, 기체 유량 및 공급된 동력이 플라즈마 밀도 및 전자 온도에 미치는 영향을 검토하였다.

Abstract – A two-dimensional fluid modeling was performed for the analysis of the high-density plasma source. The model coupled plasma transport, neutral species dynamics, gas flow, heat transfer, and plasma power coupling from an external source. The governing equations for multicomponent transport system were solved along with Maxwell's equations for inductively coupled power deposition. The model was applied to a chlorine discharge in the plasma source chamber of helical resonator. The effects of reactor pressure, gas flow rate, and deposited power on the plasma density and the electron temperature were examined.

Key words: Two-Dimensional Modeling, High-Density Plasma, Helical Resonator, Chlorine Discharge

1. 서 론

플라즈마를 이용한 에칭이나 증착 공정은 초소형 전자 소자 제작에 있어서 중요한 역할을 하고 있다[1]. 특히, 오늘날의 반도체 산업은 200 mm에서 300 mm 웨이퍼로의 대면적화와 0.18 μm 형상 크기로의 축소화로 진행되고 있으며[2], 이를 위해서는 대면적의 웨이퍼에 걸쳐서 유례없는 엄밀한 균일성(uniformity), 종횡비가 큰 비등방성(anisotropy), 그리고 경제적인 측면에서 높은 생산성(throughput)을 유지해야 한다[3].

200 mm 이상의 웨이퍼에서 엄밀한 균일성을 얻기 위해서 반도체 공정은 단일 웨이퍼 공정으로 이루어져야하며, 종횡비가 큰 비등방성을 위해서는 저압이 요구되고 독립적인 웨이퍼 바이어스(bias)가 필요하다[4]. 그러나, 기존의 RIE 플라즈마 반응기에서는 이러한 저압에서 충분한 고밀도의 플라즈마를 얻을 수 없어 생산성을 유지할 수 없다. 또한, 이러한 반응기는 플라즈마를 발생시키기 위해 필요한 전극 위에 웨이퍼를 놓아야 하기 때문에 웨이퍼에 독립적으로 바이어스를 걸어줄 수 없다. 그러나, 고밀도($>10^{11} \text{ cm}^{-3}$) 플라즈마(high density plasma; HDP)는 균일성의 향상과 불순물의 감소를 위해 저압($<10 \text{ mmTorr}$)으로 운전하며, 웨

이퍼 표면에 이온과 라디칼의 높은 플럭스(flux)가 도달하도록 하여 생산성의 향상을 위해 높은 밀도를 유지할 수 있다. 또한, 저압 조건에서는 이온의 평균 자유행로(mean free path)가 sheath 길이보다 길어 이온이 sheath 영역에서 웨이퍼와 수직하게 입사할 수 있으므로 높은 비등방성을 얻을 수 있다. 이외에도 웨이퍼 바이어스를 통해 이온 에너지와 이온 플럭스를 독립적으로 제어할 수 있으므로 높은 선택성(selectivity)을 유지할 수 있다.

따라서, 이러한 저압, 고밀도 플라즈마를 이용한 차세대 반응기들이 개발되었으며 이를 이용하면 균일성, 비등방성, 그리고 높은 생산성 등의 조건을 만족시킬 수 있다. 하지만, 커지는 웨이퍼 크기와 줄어드는 형상크기를 위해서는 그 때마다 부합하는 반응기 설계와 최적의 조업조건을 도출해야 하며, 물리·화학적으로 복잡한 현상도 고려해야 하므로 이를 실험에만 의존하는 것은 비용과 제작 사이클(design cycle)면에서 비효율적이다[4, 5]. 따라서, 최근에는 전산모사 프로그램의 개발을 통해 설계 비용과 시간을 최소화하는 노력이 이루어지고 있다. 그러나 기존의 고밀도 플라즈마 반응기 모사는 ECR(Electron Cyclotron Resonance) [6-9]이나 ICP(Inductive Coupled Plasma) [2-3, 5, 10-11]로 국한되어 왔으며, 보다 빠른 식각속도와 보다 나은 균일도를 보이는 헬리컬 공진기에 대한 연구[4]는 거의 이루어지지 않고 있다.

[†]E-mail: cbshin@madang.ajou.ac.kr

따라서 본 연구에서는 이러한 고밀도 플라스마중의 하나인 헬리컬 공진기를 연구의 대상으로 하였다. 본 모델링에서는 반응기내의 기체의 유동, 온도분포, 하전입자와 중성입자의 생성, 다성분계 전달현상, 기상 반응과 공급된 동력 등을 고려할 수 있는 수학적 모델을 제시하고, 유한요소법에 근거하여 전산모사를 수행하였다. 이를 통해 헬리컬 공진기의 방전영역에서의 각종 이온과 전자의 온도와 밀도의 2차원 분포를 살펴보았다.

2. 수학적 모델링

본 연구에서 해석의 대상으로 삼은 헬리컬 공진기의 방전영역의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다[12]. 직경 4.8 cm의 실린더형의 발생영역의 길이가 23.0 cm이고 그중 코일에 의해 감싸진 부분이 14.4 cm이다. 발생실의 상단으로부터 반응기체인 Cl_2 가 균일하게 아래로 유입된다.

전자(<1 ns)와 그 외의 화학종(이온에 대하여 수십 μ s, 중성자에 대하여 수백 ms)의 수송과 화학반응 시간의 큰 차이로 인한 문제를 해결하기 위한 방법으로 모듈방식을 사용하였다.

2-1. 기본 가정

- (1) 반응기는 bulk 영역과 sheath 영역으로 구분하여 수행한다.
- (2) 유입된 기체와 반응에 의해 생성된 반응 혼합물의 유동은 continuum으로 해석한다. 이러한 가정이 적용되기 위하여 Knudsen number($Kn = \lambda/L$)

L)가 작아 벽면과의 충돌보다 입자끼리의 충돌이 많은 molecular diffusion이어야 한다. 그러나 헬리컬 공진기의 경우 압력이 낮아 transition diffusion 영역($0.01 < Kn < 1$)에 속한다. 이러한 경우 반응기의 벽면에서 slip 경계조건을 적용하면 상당히 낮은 압력 범위까지도 continuum 이론이 적용 가능한 것으로 알려져 있으며[13], 이를 적용하여 해석한 연구 역시 그 타당성을 보고하고 있다.

(3) Ambipolar diffusion을 따른다.

(4) Bulk 플라스마는 전기적으로 중성(electroneutrality)이다.

(5) 이상기체 법칙과 Newton 법칙을 따르는 유체로 간주한다.

(6) Reynolds수가 충분히 작아서 층류(laminar flow)이다.

(7) 점성소산(viscous dissipation)에 의한 기체의 온도상승은 무시할 만하다.

(8) 입자들의 확산계수(diffusivity)와 이동도(mobility)는 일정하다.

2-2. 지배방정식

2-2-1. 전자기 모듈

무한히 긴 솔레노이드(solenoid)에서 시간에 따라 변하는 전기장의 경우 파동방정식은 다음과 같다 :

$$\frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mathbf{E}_\theta(r) = \frac{\omega^2}{c^2} K \mathbf{E}_\theta(r) \quad (1)$$

$$K = \left[1 + \frac{i}{\omega \epsilon_o} \sigma_\omega \right] \quad (2)$$

$$\sigma_\omega = \frac{\epsilon_o \omega_{pe}^2}{v_{en} - i\omega} \quad (3)$$

이때 다음과 같은 경계조건을 이용하여 파동방정식의 해를 구하였다:

$$E_\theta = 0 \quad \text{at } r=0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \operatorname{Im}(\mathbf{E}_\theta(r))] = H_z(R) \frac{\omega}{c} = \frac{\omega^2}{\epsilon_o c^2} I \quad \text{at } r=R \quad (5)$$

따라서, 플라스마로 공급된 동력은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\sigma_\omega |\mathbf{E}_\theta|^2) \quad (6)$$

2-2-2. 전자에너지 모듈

전자에너지 수지식은 기존에 사용한 것과는 달리 코일에 의해 외부에서 공급되는 동력 즉 P_{ext} 항을 고려하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{3}{2} n_e k T_e \right) + \nabla \cdot \mathbf{q}_e + e \mathbf{J}_e \cdot \mathbf{E} + 3 \frac{m_e}{M} n_e k v_m (T_e - T) \\ - P_{ext} + \sum_j H_j R_j = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

식의 우변에서 전자온도와 기체온도의 차로 구성된 항은 전자의 탄성 충돌에 의한 전자에너지의 소실을 나타내고, 좌변의 마지막 항은 모든 전자의 비탄성 충돌로 인해 소실되는 에너지를 고려한 것이다. 한편 q_e 는 전자에너지 전속을 나타내고

$$\mathbf{q}_e = -K_e \nabla T_e + \frac{5}{2} k T_e \mathbf{J}_e \quad (8)$$

로 표현된다. 여기서 K_e 는 전자의 전도도(thermal conductivity)를 나타내고

$$K_e = \frac{3}{2} k D_e n_e \quad (9)$$

이다.

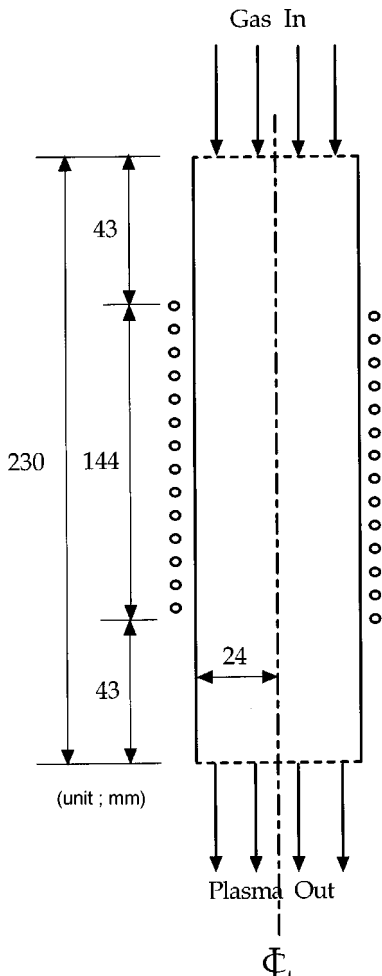


Fig. 1. Schematic diagram for the source chamber of the helical resonator plasma source.

2-2-3. 하전입자 모듈

Cl_2^+ , Cl^+ , 그리고 Cl^- 와 같은 하전된 입자는 다음과 같은 질량 보존 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_k = \sum_j \mathbf{R}_{kj} \quad (10)$$

$$\mathbf{J}_k = -D_k \nabla n_k + q_k \mu_k n_k \mathbf{E} + \mathbf{u} n_k \quad (11)$$

식 (10)의 우변의 항은 하전된 입자 k 의 생성과 소멸의 모든 반응을 고려한 것이다. 또한, 식 (11)에서 나타난 하전입자의 플럭스는 농도 구배에 의한 확산, 전기장에 의한 drift, 그리고 대류 유동(convective flow)을 고려하였다.

또한 self-consistent 정전기장을 구하기 위해 다음과 같이 ambipolarity 를 이용하였다.

$$\mathbf{E} = \frac{\sum_k q_k D_k \nabla n_k}{\sum_k q_k \mu_k n_k} \quad (12)$$

전자의 밀도는 전기적 중성(electroneutrality)을 이용하여 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$n_e = n_{\text{Cl}_2^+} + n_{\text{Cl}^+} - n_{\text{Cl}^-} \quad (13)$$

2-2-4. 중성입자 모듈

반응기 내의 중성입자 혼합물에 대해 적용되는 물질 수지식은 다음과 같다.

(질량 보존식)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (14)$$

(운동량 보존식)

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \quad (16)$$

(에너지 보존식)

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \boldsymbol{\tau} : (\nabla \mathbf{u}) + Q_{\text{coll}} \quad (17)$$

한편, Cl 에 대한 수지식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial n_{\text{Cl}}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_{\text{Cl}} = \sum_j \mathbf{R}_{\text{Cl}j} \quad (18)$$

$$\mathbf{J}_{\text{Cl}} = -D_{\text{Cl}} \nabla n_{\text{Cl}} + \mathbf{u} n_{\text{Cl}} \quad (19)$$

마지막으로 Cl_2 의 밀도분포는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$n_{\text{Cl}_2} = \frac{p}{kT} - n_{\text{Cl}} \quad (20)$$

2-3. 경계조건

본 연구에서는 헬리컬 공진기의 발생영역의 축을 중심으로 절반을 수치해석 영역으로 사용하였기 때문에 반응기의 중심부에서는 대칭(symmetry) 조건을 이용하였으며, 벽에서의 경계조건은 Table 1에 나타났다.

반응기 벽면에서 속도에 대한 경계조건은 slip 조건을 사용하였다. 일반적으로 고체 표면에서는 no-slip 조건을 사용하나 본 연구에서는 압력이 매우 낮아 Knudsen number가 큰 경우로 벽면에서 slip 조건을 이용함으로써 유체모델을 적용할 수 있다. 반응기 벽의 온도에 대한 경계조건은 thermal accommodation coefficient, A 를 사용하여 나타낼 수 있

Table 1. Boundary conditions used for the helical resonator simulation

Quantity	Boundary Conditions at Walls
\mathbf{u}	$\mathbf{u} \cdot \mathbf{s} = \lambda \frac{\partial \mathbf{u}_s}{\partial n}$
T	$T - T_w = \frac{2}{Pr} \left(\frac{2-A}{A} \right) \left(\frac{\gamma}{\gamma+1} \right) \frac{\partial T}{\partial n}$
n_{Cl}	$J_{\text{Cl}} = \frac{1}{4} n_{\text{Cl}} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_{\text{Cl}}}} \frac{2s}{2-s}$
$n_{\text{Cl}_2^+}, n_{\text{Cl}^+}$	$J_k = n_k \left(\frac{kT_e}{m_k} \right)^{1/2}$
n_{Cl^-}	$n_{\text{Cl}^-} = 0$
T_e	$q_e = \left(\frac{5}{2} kT_e \right) J_e$

다. A 는 경험치로서 본 연구에서는 0.5로 취하였다. Cl 의 밀도에 대해서 적용한 경계조건은 sticking coefficient, s 를 이용하여 나타냈으며 그 값을 1로 가정하였고, Cl^- 에 대하여는 벽면에 형성된 sheath에 의해 반발력이 작용하기 때문에 벽에서의 플럭스가 없다고 가정하였다.

2-4. 전산모사 방법

미지변수 $\mathbf{u}, P, T, T_e, P_{\text{ext}}, n_{\text{Cl}_2}, n_{\text{Cl}_2^+}, n_{\text{Cl}^+}, n_{\text{Cl}^-}, n_e$ 의 해를 구하기 위해서는 앞에서 열거한 지배방정식들을 연립하여 풀어야만 한다. 하지만 지금까지 행한 수치 실험에 의하면 이 연립 편미분 방정식들을 동시에 연립하여 풀어서는 수렴하는 결과치를 얻기가 힘들며 계산 시간도 오래 걸리게 된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 모듈방식을 이용하였다. 즉 서로 연립된 지배방정식들을 4개의 모듈로 나누어 계산하는 방식이다. Fig. 2에 모듈끼리 필요한 정보를 주고받으며 결과치들이 수렴할 때까지 계산을 반복 수행하는 모듈방식을 나타냈다.

각 모듈에서 해당하는 지배방정식과 경계조건을 만족하는 해를 구하기 위하여 Galerkin 유한요소법을 사용하였다. 반응기 발생영역의 mesh는 248개의 biquadratic elements와 1,071개의 nodes로 구성된다.

한편 중성 입자 모듈의 질량과 운동량 수지식의 weak form이 속도에 대하여 1차 미분이나 압력에 대하여 0차 미분이기 때문에 기체 압력에 사용한 interpolation 함수의 선택이 제한되고, 압력이 natural 경계조건

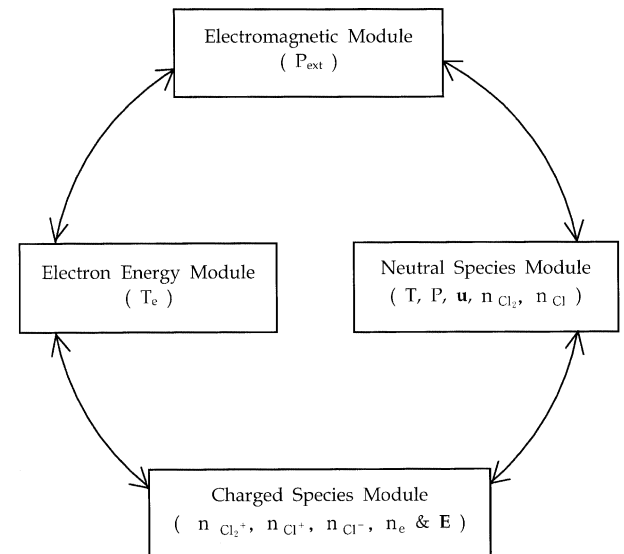


Fig. 2. Schematic of modular approach used to achieve fast convergence to the steady-state.

으로 입력된다. 이는 압력이 element간의 경계에서 변수로서 작용하지 않는다는 의미이다. 따라서, 속도장에 사용한 interpolation 함수보다 차수가 하나 감소된 interpolation 함수를 사용할 수 있으므로, 속도, 온도, 각 성분의 밀도와 전자온도에는 biquadratic basis function을 사용하고 압력에는 bilinear basis function을 사용하는 mixed order interpolation을 적용하였다. 그리고 비선형성을 해결하기 위하여 Newton의 방법을 사용하였다. 계산은 SUN Ultra 1 workstation에서 수행하였다. 이때 소요되는 cpu time은 약 6분이었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 반응기 압력 3.5 mTorr, 플라스마 동력 300 W, 공급되는 Cl_2 기체의 유량 10 sccm, 그리고 공급 기체의 초기 온도 298 K을 기본 조건(base conditions)으로 설정하였으며, 정상상태에서의 현상을 살펴보았다. 앞으로 조건에 대한 특별한 언급이 없는 경우 기본 조건을 사용한다.

Fig. 3은 기체의 속도 벡터와 압력장을 나타내었다. 기체의 유동에 기인한 대류 효과와 기체 가열로 인한 중성 입자의 밀도의 희박화(rarefaction) 현상을 살펴볼 수 있다. slip 경계 조건으로 인해 벽면에서의 기체 유속이 존재하며, 기체가 가열되는 동력 공급영역에서는 가속화 현상이 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 반응기를 둘러싸고 있는 코일에 흐르는 전류로 인해 전자기장이 발생하여 공급된 동력의 분포를 나타낸 그림이다. 전자기파가 고밀도 플라스마를 투과해 진행할 수 없기 때문에 동력의 대부분이 코일 근처 즉 벽면 부근에 공급된다. 최고점에서의 공급된 동력은 10 W/cm^3 이상이지만 반응기 전체 부피에 대한 공급된 동력은 1 W/cm^3 이하의 값을 갖는다. Fig. 5는 중성기체와 전자온도의 분포를 나타내었다. 전자온도는 벽면에서의 공급된 동력으로 인해 최대값을 갖는 위치가 반응기 벽면 쪽으로 이동하였다. 벽면에서 최대값을 갖지 않는 이유는 벽면에서는 대기에 의해 열의 손실이 있기 때문이다. 한편 중성 기체의 온도가 최대인 위치는 입구로부터 유입되는 기체의 대류로 인해 반응기 하부로 이동하였다.

Fig. 6은 Cl^- 와 전자의 밀도 분포를 나타내었다. Cl^- 의 밀도가 최대인 위치는 반응기 축 중앙에서 나타났으며, 벽에서는 0으로 급격히 감소함

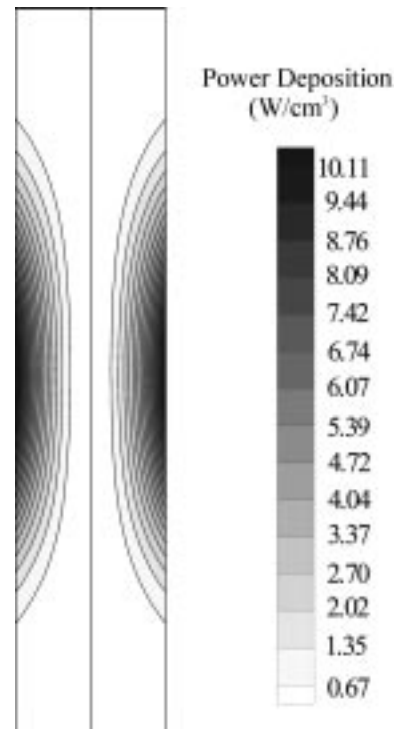


Fig. 4. Power deposition profiles in the reactor. Base case conditions.

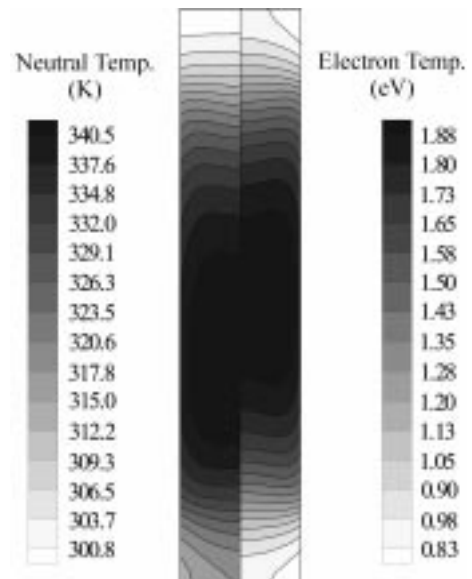


Fig. 5. Neutral(left) and electron(right) temperature profiles in the reactor. Base case conditions.

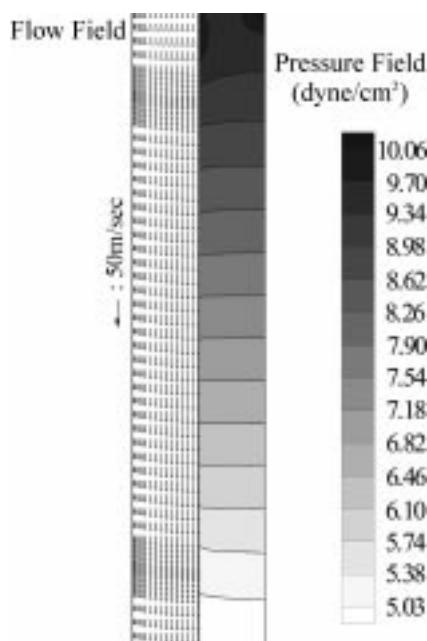


Fig. 3. Flow(left) and pressure(right) field profiles in the reactor. Base case conditions.

을 볼 수 있다. 이는 Cl^- 가 벽면에 형성된 sheath로 인해 반발력이 작용하기 때문에 플럭스가 없기 때문이다. 따라서, Cl^- 의 손실은 이온-이온 결합반응과 전자의 충돌에 의한 분리(detachment) 반응에 의한 손실을 포함하는 기상 반응에 의해서 이루어진다. 한편 전자는 Cl^- 와 같은 전하로 하전되어 있더라도 그 질량이 Cl^- 에 비해 매우 작기 때문에 sheath를 통과해서 반응기 벽에 도달할 수 있으므로 벽면에서 플럭스가 0이 아니다. 따라서, 전자의 밀도 분포도 Cl^- 의 밀도 분포와 같은 경향을 보이지만 반경 방향으로 더 넓게 분포한다. Fig. 7은 Cl^+ 와 Cl_2^+ 의 밀도 분포를 나타낸 그림이다. Cl^+ 와 Cl_2^+ 모두 축 중앙에서 최대값을 나타낸다. 일반적으로 양으로 하전된 이온의 공간상의 밀도 분포에서 공급된

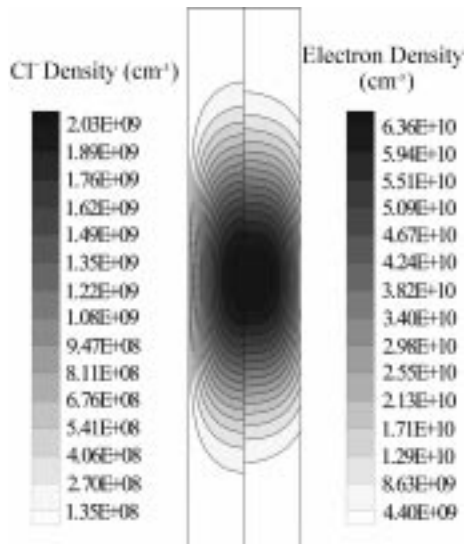


Fig. 6. Cl^- (left) and electron(right) density profiles in the reactor. Base case conditions.

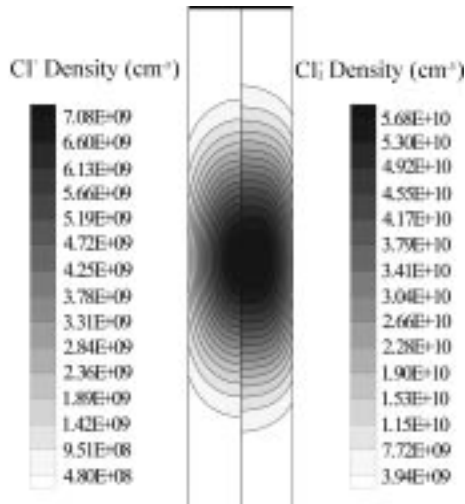


Fig. 7. Cl^+ (left) and Cl_2^+ (right) density profiles in the reactor. Base case conditions.

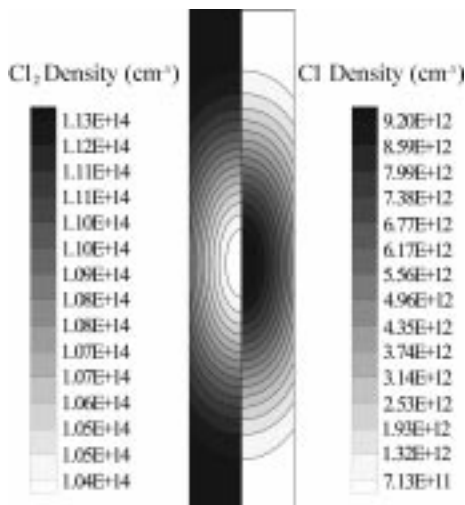


Fig. 8. Cl_2 (left) and Cl (right) density profiles in the reactor. Base case conditions.

동력, 압력, 그리고 반응기 종횡비(aspect ratio; height/radius)에 의존하는데 종횡비가 크면 즉, 반응기 반경보다 길이가 길면 축 상에 최대 밀도가 나타나고, 반대로 종횡비가 작으면 축에서 벗어난 위치에서 최대 밀도를 나타낸다. Fig. 8은 Cl_2 와 Cl 의 밀도 분포를 나타낸 그림이다. 축 중앙에서 Cl_2 의 분포가 여러 플라스마 반응에 의해 소실되어 최소 밀도를 보이는 반면에 Cl 의 밀도는 축 중앙에서 최대가 됨을 알 수 있다.

다음으로 유량, 압력 그리고 공급된 동력에 따른 전자온도의 거동을 살펴보았다. 전자온도는 플라스마 반응에서 속도 상수에 직접적인 영향을 미치는 인자이다. Fig. 9는 유량에 따른 전자온도 변화를 나타낸 그림이다. 유량이 증가할수록 전자온도는 감소하였다. 이는 일정한 동력에서 동력을 흡수하는 입자들의 밀도가 유량의 증가에 따라 커지므로 입자 당 흡수하는 에너지 양이 적어지기 때문이다. Fig. 10은 압력에 따른 전자온도 변화를 나타낸 그림이다. 압력이 증가할수록 전자온도는 감소하였다. 이는 반응기 내의 압력이 증가하면 입자간의 평균 자유행로가 줄어 충돌에 의한 에너지 손실이 많아지기 때문이다. 특히 1 mTorr에서 3 mTorr로 증가할 때 그 변화 폭이 크게 나타난다. 이는 평균 자

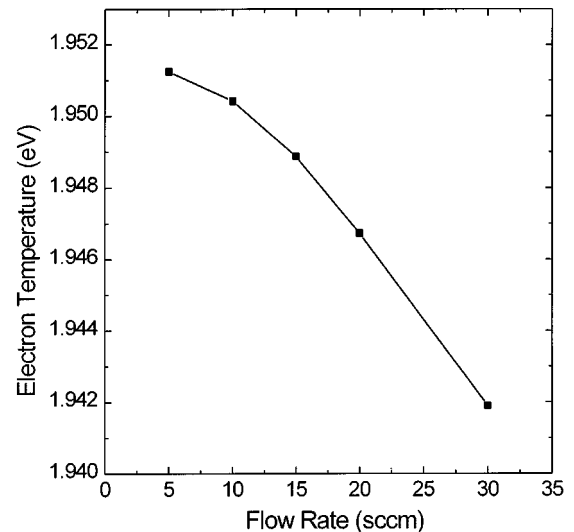


Fig. 9. Maximum electron temperature in the source chamber, as a function of flow rate.

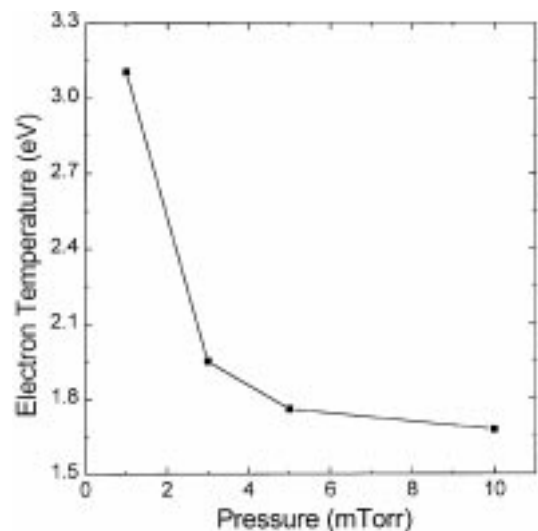


Fig. 10. Maximum electron temperature in the source chamber, as a function of pressure.

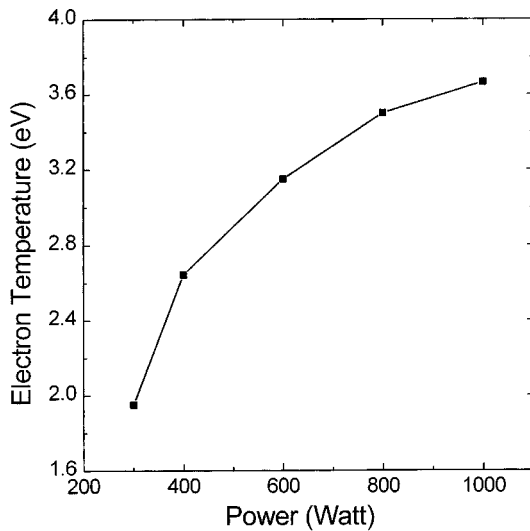


Fig. 11. Maximum electron temperature in the source chamber, as a function of deposition power.

유행로 λ 가 1 mTorr에서 대략 5 cm이고 반응기의 직경이 4.8 cm로 Knudsen 영역이기 때문에 입자간의 충돌로 인해 얻은 전자의 에너지보다 전자기장에 의한 비충돌 전자 가열이 지배적이기 때문이다. Fig. 11은 동력에 따른 전자 온도 변화 양상을 나타낸 그림이다. 동력이 증가할수록 전자 온도는 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고밀도 플라즈마 반응기인 헬리컬 공진기의 플라즈마 발생영역에서의 플라즈마 특성을 플라즈마 전달현상, 중성입자 동력학, 기체 유동, 열전달 및 외부로부터 공급되는 동력의 영향 등을 고려함으로써 전산모사하였다. 전자와 다른 입자(이온, 중성자)의 수송과 반응시간의 큰 차이를 극복하기 위해 모듈방식을 사용하였으며 낮은 압력에서도 유체적 접근을 위해 수정된 경계조건을 채택하였다.

기본 조건(반응기 압력 3.5 mTorr, 플라즈마 동력 300 W, 공급되는 Cl_2 기체의 유량 10 sccm, 그리고 공급 기체의 초기 온도 298 K)에서 중성 입자의 최고온도는 축상에 나타나지만 유입기체의 대류현상으로 인해 하부로 이동하였다. 그러나 전자의 최고 온도는 외부에서 걸어준 전자기장으로 인해 대류의 영향을 거의 받지 않고 공급된 동력이 벽면에서 최대가 되기 때문에 축 중앙에서 벽면 근처로 이동하였다. 한편 Cl_2^+ , Cl^+ , Cl , Cl^- 그리고 전자의 밀도는 모두 축상에서 최대값을 나타내지만 벽면의 sheath의 영향과 공급되는 동력의 영향으로 인해 반경방향으로 감소하는 정도는 다르게 나타났다. 즉 전자와 Cl^- 와 같이 음으로 하전된 입자의 경우 벽면의 sheath로 인해 반발력이 작용하므로 다른 입자의 경우보다 반경방향으로 급격한 밀도 구배가 형성되었다. 압력에 따라 전자온도는 감소하였으며, 특히 Knudsen영역과 전이영역 사이에 큰 차이를 보였다. 또한 전자온도는 동력이 증가할수록 유량이 감소할수록 증가하는 경향을 나타냈다.

본 연구의 결과는 반도체 공정에서 요구되는 까다로운 조건들을 충족시킬 수 있는 보다 개선된 성능을 가진 플라즈마 반응기의 설계 및 최적의 운전조건 도출에 효과적으로 활용될 수 있다.

감 사

본 논문의 저자중 Stas Berezhnoj는 '99 러시아 및 동구권 과학기술자

유치사업(99러유06-016)에 의하여 아주대학교에서의 연구를 지원 받았 습니다.

사용기호

A	: thermal accommodation coefficient
c	: speed of light [m/s]
C_p	: specific heat [J/mol · K]
D	: diffusion coefficient [m^2/s]
E	: electric field [V/m]
e	: charge of an electron [1.602×10^{-19} C]
g	: statistical weight [m^2/s]
H	: enthalpy [eV]
I	: current density [A/m]
J	: species flux [$1/\text{m}^2 \text{ s}$]
k	: Boltzmann's constant [1.381×10^{-23} J/K]
K_e	: electron conductivity [J/m · s · K]
L	: characteristic length [m]
m	: mass [kg]
n	: density [$1/\text{m}^3$]
P	: power [W]
p	: pressure [J/cm ³]
Q	: heat [J]
q_e	: electron energy flux [$\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
R	: reaction rate [$\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
s	: sticking coefficient
T	: temperature [K]
t	: time [s]
u	: velocity [m/s]

그리스 문자

ω	: frequency [Hz]
ν	: collision frequency [Hz]
ϵ_0	: vacuum permittivity [8.854×10^{-12} F/m]
γ	: ratio of specific heat
λ	: mean free path [m]
μ	: viscosity [$\text{Kg}/\text{m} \cdot \text{s}$]
ρ	: density [Kg/m^3]
τ	: stress tensor

하첨자

coll	: collision
e	: electron
ext	: external
k	: charged species (Cl_2^+ , Cl^+ , Cl^-)
n	: neutral
pe	: xzasma
r	: r-direction
θ	: θ -direction

참고문헌

1. Lieberman, M. A. and Gottscho, R. A.: "Design of High Density Plasma Sources for Material Processing," in Physics of Thin Films, Francombe, M. and Vossen, J., Eds. Orlando, FL(1993).

2. Bose, D., Govindan, T. R. and Meyyappan, M.: IEEE Trans. *Plasma Sci.*, **23**, 4(1995).
3. Bose, D., Govindan, T. R. and Meyyappan, M.: *J. Electrochem. Soc.* **146**, 7(1999).
4. Lee, J. T. C.: *Solid State Technol.*, August(1996).
5. Meyyappan, M. and Govindan, T. R.: *Vacuum*, **47**, 3(1996).
6. Meyyappan, M. and Govindan, T. R.: IEEE Trans. *Plasma Sci.*, **23**, 4 (1995).
7. Hussein, M. A. and Emmert, G. : *J. Vac. Sci. Technol.*, **A8**, 3(1990).
8. Nam, S. K., Shin, C. B., Economou, D. J.: *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, 2(1999).
9. Shin, C. B., Hur, J. S. and Oh, S. G.: *Thin Solid Films*, 341(1999).
10. Wise, Richard S., Lymberopoulos, D. P. and Economou, D. J.: *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 18(1996).
11. Johannes, J., Bartel, T., Hebner, G. A., Woodworth, J. and Economou, D. J.: *J. Electrochem. Soc.*, **144**, 7(1997).
12. Donnelly, V. M.: *J. Vac. Sci. Technol.*, **A14**, 3(1996).
13. Present, R. D.: "Kinetic Theory of Gases," McGraw-Hill, New York (1958).