

# 식각공정용 가스방전에서 이온 및 활성종 밀도의 전자밀도 및 온도 의존성에 대한 수치해석적 분석

안충기<sup>a</sup> · 박민혜<sup>a</sup> · 손형민<sup>a</sup> · 신우형<sup>a</sup> · 권득철<sup>b</sup> · 유신재<sup>c</sup> · 김정형<sup>c</sup> · 윤남식<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>충북대학교 전기공학과, 청주 361-763,

<sup>b</sup>국가핵융합연구소, 대전 305-333,

<sup>c</sup>한국표준과학연구원, 대전 305-306

(2011년 7월 25일 받음, 2011년 10월 25일 수정, 2011년 11월 1일 확정)

식각공정에 주로 사용되는 Cl<sub>2</sub>/Ar, CF<sub>4</sub>, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, 그리고 SF<sub>6</sub> 가스 방전에서 이온, 중성종 및 활성종 밀도의 전자밀도와 온도에 대한 의존성을 수치해석적으로 분석하였다. 이온, 중성종 및 활성종 밀도에 대한 공간평균 유체방정식을 정상상태로 가정하여 상대적으로 측정이 용이한 전자밀도와 온도에 대한 식으로 표현하였고, 이 식을 수치해석적인 방법으로 풀었다. 계산에 사용된 반응계수들은 여러 문헌에서 수집되거나 산란단면적으로부터 계산되었고, 같은 반응에 대해 다른 값을 보일 경우, 계산 결과를 실험 결과와 비교하여 높은 일치도를 보이는 값이 선택되었다.

**주제어** : 플라즈마, 활성종 조성, 식각 공정

## I. 서 론

식각공정에서 사용되는 대표적인 가스로는 Cl<sub>2</sub>/Ar, CF<sub>4</sub>, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, 그리고 SF<sub>6</sub> 등이 있으며, 최근에는 새로운 식각공정용 가스에 대한 개발 또한 활발히 진행되고 있다. 여기서, 염소 계열의 가스는 Al, Cr, 그리고 Au와 같은 금속식각에 사용되고 있으며, 탄화불소 계열 가스는 Si와 SiO<sub>2</sub> 막 등을 식각하는데 널리 사용되고 있다. 이러한 복합가스의 방전 시 발생하는 중성종, 활성종 및 이온의 조성이 식각 특성에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 이를 분석하기 위한 플라즈마 진단이나 이론적인 연구가 활발하게 진행되고 있는 상황이다.

전자밀도와 온도는 정전탐침(electrostatic probe)과 차단탐침(cutoff probe) [1,2] 등을 사용하여 활성종 및 중성종 밀도에 비해 상대적으로 쉽게 측정할 수 있고, 활성종과 중성종은 LIF (Laser-Induced Fluorescence) 방법 [2], OES (Optical Emission Spectrometry) 방법 [3], 그리고 QMS (Quadrupole Mass Spectrometry) 방법 [4] 등을 이용하여 측정할 수 있으나 절대적인 크기를 측정할 수 있는 경우는 매우 제한적이며, 측정된 스펙트럼의 분석이 어려

운 것으로 알려져 있다. 또한 방전특성 분석을 위해 다양한 플라즈마 전산모사 [5-14]가 이루어져 왔으나, 전산모사 결과와 측정값 사이의 일치도가 항상 만족스러운 것은 아니며 보다 정확한 전산모사와 측정에 대한 연구들이 많이 진행되어 왔다. 이러한 상황에서 비교적 신뢰성이 널리 인정되고 있는 전자밀도와 온도의 측정치를 기반으로 활성종과 중성종 밀도를 계산하는 프로그램은 전산모사 프로그램과 더불어 유용한 분석도구 중 하나로 활용될 수 있을 것이며, 본 연구에서는 반응계수들의 정확성을 비교 검토하는 과정을 병행하여 이와 같은 활성종 및 중성종 밀도 분석 프로그램을 제작하였다.

선행 연구로 Kim 등 [2]에 의해 CF<sub>4</sub> 가스방전에 대하여 유사한 연구가 진행된 바 있으며, 본 연구에서는 이를 확장하여 다양한 식각 공정용 가스에 대하여 이온, 중성종 및 활성종의 밀도를 계산하였다. 방전 시 발생하는 다양한 종들의 밀도에 대한 공간평균 유체방정식을 정상상태로 가정하여 상대적으로 측정이 용이한 전자밀도와 온도에 대한 식으로 표현하였다. 계산에 사용된 반응계수는 실험적으로 측정된 충돌 산란단면적과 이를 기반으로 산출된 값들을 기반으로 하였다. 그러나 반응계수를 산출하는 방법이나

\* [전자우편] nsyoon@cbnu.ac.kr

고려한 전자 에너지의 범위 및 분포 함수에 따라 반응계수의 차이를 보이고 있어, 기존에 발표되었거나 직접 계산한 데이터를 이용한 계산 결과를 실험 결과와 비교하여 일치도가 높은 데이터를 선택하였으며, 개발된 프로그램을 통해 전자밀도와 온도에 대한 이온, 중성종 및 활성종 밀도의 의존성을 분석하였다.

이어지는 II장에서는 기본 방정식과 고려된 반응을 정리하였으며, III장에서는 밀도 계산 결과를 전자밀도와 온도의 의존성으로 나타내었고, IV장에서는 III장의 결과로부터 분석된 사실들을 종합하여 정리하였다.

## II. 모델링

밀도 계산에 고려된 종은 Table 1에 나열하였고, 반응 및 반응계수에 대한 참고문헌은 Table 2에 정리하였다. 이온, 중성종 및 활성종 밀도에 대한 공간평균 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_j k_{ij} n_e n_j + \sum_{j,k} k_{ijk} n_j n_k - n_i \left( \sum_j k_{ji} n_e + \sum_{i,k} k_{jik} n_k \right) - n_i \nu_{loss,i} + \frac{Q_{flow}}{\Omega} - \frac{V_P}{\Omega} n_i \quad (1)$$

여기서  $n_i$ 와  $n_e$ 는 각각  $i$ 종과 전자의 밀도이다.  $k_{ij}$ 는  $j$ 종과 전자가 충돌하여  $i$ 종을 생성하는 반응의 계수이고,  $k_{ijk}$ 는

Table 1. Considered species in this work for Cl<sub>2</sub>/Ar, CF<sub>4</sub>, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> and SF<sub>6</sub> discharges (CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> and C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> include all species of CF<sub>4</sub>).

Input gas	Considered species
Cl <sub>2</sub> /Ar	Cl, Cl, Ar, Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup> , Cl <sup>+</sup> , Ar <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> , e
CF <sub>4</sub>	CF <sub>3</sub> , CF <sub>2</sub> , CF, C, F <sub>2</sub> , F, CF <sub>3</sub> <sup>+</sup> , CF <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CF <sup>+</sup> , F <sup>+</sup> , F <sup>-</sup> , e
CF <sub>4</sub> / O <sub>2</sub>	CF <sub>3</sub> , CF <sub>2</sub> , CF, C, F <sub>2</sub> , F, O <sub>2</sub> <sup>*</sup> , O, O <sup>*</sup> , COF <sub>2</sub> , COF, CO <sub>2</sub> , CO, CF <sub>3</sub> <sup>+</sup> , CF <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CF <sup>+</sup> , F <sup>+</sup> , O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , O <sup>+</sup> , O <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> , e
CF <sub>4</sub> / H <sub>2</sub>	CF <sub>3</sub> , CF <sub>2</sub> , CF, C, F <sub>2</sub> , F, HF, CHF <sub>3</sub> , CF <sub>3</sub> <sup>+</sup> , CF <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CF <sup>+</sup> , F <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , H <sup>+</sup> , F <sup>-</sup> , e
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	CF <sub>3</sub> , CF <sub>2</sub> , CF, C, F <sub>2</sub> , F, CF <sub>3</sub> <sup>+</sup> , CF <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CF <sup>+</sup> , F <sup>+</sup> , F <sup>-</sup> , e
C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>7</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> , CF <sub>3</sub> , CF <sub>2</sub> , CF, C, F <sub>2</sub> , F, C <sub>3</sub> F <sub>5</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> <sup>+</sup> , CF <sub>3</sub> <sup>+</sup> , CF <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CF <sup>+</sup> , F <sup>+</sup> , C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> , e
SF <sub>6</sub>	SF <sub>5</sub> , SF <sub>4</sub> , SF <sub>3</sub> , F <sub>2</sub> , F, SF <sub>5</sub> <sup>+</sup> , SF <sub>4</sub> <sup>+</sup> , SF <sub>3</sub> <sup>+</sup> , F <sub>2</sub> <sup>+</sup> , SF <sub>6</sub> <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> , e

$j$ 종과  $k$ 종이 충돌하여  $i$ 종을 생성하는 반응의 계수이다.  $Q_{flow}$

Table 2. Included reactions in each discharge (CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> and C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> include all reactions of CF<sub>4</sub>).

Reactions	Ref.
Cl <sub>2</sub> /Ar discharges	
Electron collision reactions	
electron collision with argon	[5]
$e + Cl^* \rightarrow Cl^+ + 2e$	[5]
$e + Cl_2 \rightarrow Cl_2^+ + 2e$	[15] <sup>b</sup>
$e + Cl \rightarrow Cl^+ + 2e$	[15] <sup>b</sup>
$e + Cl^- \rightarrow Cl + 2e$	[15] <sup>b</sup>
$e + Cl_2 \rightarrow 2Cl + e$	[15] <sup>a</sup>
$e + Cl \rightarrow Cl^* + e$	[15] <sup>b</sup>
$e + Cl_2 \rightarrow Cl^- + Cl$	[16]
Neutral-neutral reactions	[5]
Ion-neutral reactions	[5]
CF <sub>4</sub> discharge	
Electron collision reactions	
Neutral-neutral reactions	[2]
$CF_3 + F \rightarrow CF_4$	[2]
$CF_2 + F \rightarrow CF_3$	[2]
$CF + F \rightarrow CF_2$	[2]
Other reactions	[17]
Ion-neutral reactions	
$CF_3 + F^- \rightarrow CF_4 + e$	[2]
Other reactions	[17]
Ion-ion reactions	
CF <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> discharges	
Electron collision reactions	
$e + O_2 \rightarrow O_2^+ + 2e$	[18]
$e + O_2 \rightarrow O^+ + O + 2e$	[18]
$e + O_2 \rightarrow O^- + O$	[18]
$e + O_2^* \rightarrow O_2 + e$	[19]
$e + O_2^+ \rightarrow O_2^+ + 2e$	[19]
$e + O_2 \rightarrow O_2 + e$	[20]
$e + O_2 \rightarrow O + O + e$	[21]
$e + O_2 \rightarrow O_2^* + e$	[21]
$e + O \rightarrow O + e$	[22]
$e + O \rightarrow O^+ + 2e$	[23]
Neutral-neutral reactions	[17]
Ion-neutral reactions	[17]
Ion-ion reactions	[17]

Table 2. Continued.

Reactions	Ref.
CF <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> discharges	
Electron collision reactions	[6]
Neutral-neutral reactions	[24]
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> discharge	
Electron collision reactions	[19]
C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> discharge	
Electron collision reactions	[25]
Neutral-neutral reactions	[25]
Ion-ion reactions	[25]
SF <sub>6</sub> discharge	
Electron collision reactions	[26]
Neutral-neutral reactions	[26]
Ion-neutral reactions	[26]
Ion-ion reactions	[26]

<sup>a</sup>Resulting rate coefficient as a function of electron temperature using Maxwellian distribution assumption, <sup>b</sup>Resulting rate coefficient as a function of electron temperature using time-lag Boltzmann distribution assumption.

는 반응로 내로 유입되는 가스의 유량,  $\Omega$ 는 반응로 체적,  $\nu_{loss,i}$ 는  $i$ 종의 손실 주파수 그리고  $V_P$ 는 펌핑 속도로 각각

$$\nu_{loss,i} = \frac{S}{\Omega} \sqrt{\frac{T_e}{M_i}}, \quad V_P = \frac{Q_{flow}}{P} \quad (2)$$

이다. 여기서  $S$ 는 반응로 표면적,  $T_e$ 는 전자온도,  $M_i$ 는  $i$ 종의 질량 그리고  $P$ 는 반응로 내의 압력이다. 전자밀도 및 온도에 대한 식으로 표현하기 위해 Eq. (1)을 정상상태로 가정하면,

$$0 = \sum_j k_{ij} n_e n_j + \sum_{j,k} k_{ijk} n_j n_k - n_i \left( \sum_j k_{ji} n_e + \sum_{i,k} k_{jik} n_k \right) - n_i \nu_{loss,i} + \frac{Q_{flow}}{\Omega} - \frac{V_P}{\Omega} n_i \quad (3)$$

으로, Eq. (3)을  $n_i$ 에 대하여 다시 정리하면,

$$n_i = \frac{\sum_j k_{ij} n_e n_j + \sum_{j,k} k_{ijk} n_j n_k + \frac{Q_{flow}}{\Omega}}{\sum_j k_{ji} n_e + \sum_{i,k} k_{jik} n_k + \nu_{loss,i} + \frac{V_P}{\Omega}} \quad (4)$$

이다. Equation (4)는 화학 반응계수, 장치 외부 변수, 그

리고 전자밀도 및 온도에 대한 식으로 일정한 초기치로부터 반복대입법을 통해 해를 얻을 수 있다. 유입되는 종의 밀도는 이상기체 상태방정식으로 결정하였고, 압력은 펌핑 속도를 조절함으로써 유지될 수 있도록 하였다. 고려된 모든 종의 밀도가 수렴할 때까지 반복계산하였고, 이 때 밀도의 수렴은  $n_i$ 의 초기치 범위에 그리 민감하지 않고 잘 수렴하는 것을 알 수 있었다.

전력 평균 방정식(power balance equation)을 푸는 대신에 측정된 전자온도를 사용하기 때문에 ICP (inductively coupled plasma)나 CCP (capacitively coupled plasma) 등 여러 가지 방전에 응용될 수 있고, 전력 평균 방정식을 풀지 않을 뿐만 아니라 밀도 연속 방정식에서 시간 항이 포함되지 않아 비교적 빠른 시간 내에 결과를 얻을 수 있었다.

### III. 결 과

확보된 반응계수를 적용하여 식각공정에서 중요한 역할을 하는 Cl, F, 그리고 C/F비 [27]에 대하여 전자밀도와 온도에 대한 밀도 의존성을 분석하였다. 실험 결과와의 비교를 위해, Cl<sub>2</sub>/Ar 방전에 대해 적용한 조건은 반지름 R = 18.7 cm, 높이 L = 20 cm, 그리고 압력 = 10 mTorr이고, 탄화불소 계열 가스방전에 대해서는 R = 20 cm, L = 30 cm, 압력 = 10 mTorr, 파워 = 500 W, 혼합가스인 경우 비율은 1 : 1인 조건에서 계산하였다.

결과의 정확도를 높이기 위해서는 신뢰성 있는 충돌 산란단면적이나 반응계수의 확보가 우선되어야 한다. 플라즈마 방전에 대한 전산모사는 여러 연구 그룹에 의해 진행되어 왔으나, 적용된 반응계수는 각 그룹마다 차이를 보이는 것을 Fig. 1의 예를 통해 알 수 있다. Fig. 1(a)는 Cl 원자가 전자와 충돌하여 Cl<sup>\*</sup>로 여기 되는 반응이고, Fig. 1(b)는 전자가 O<sub>2</sub> 분자와 충돌하여 O<sub>2</sub><sup>+</sup>로 이온화되는 반응으로 [18,19,28,29] 같은 반응임에도 연구 그룹에 따라 제시하고 있는 반응계수가 다르다는 것을 알 수 있다. 각각의 반응계수는 참고문헌에 정리된 값을 사용하였고, Ref. 15<sup>a</sup>와 18에서는 충돌단면적으로부터 전자에너지 분포를 맥스웰분포(Maxwellian distribution)로 가정하여 계산하였다. 각 연구 그룹에서 고려한 반응계수를 개발된 밀도 계산 프로그램에 적용하여 실험 결과와 비교한 후 차이가 가장 작게 되는 반응계수들을 정리하였다.

이에 대한 예로, Fig. 2(a)는 Cl<sub>2</sub> 방전에 대해 Malyshev

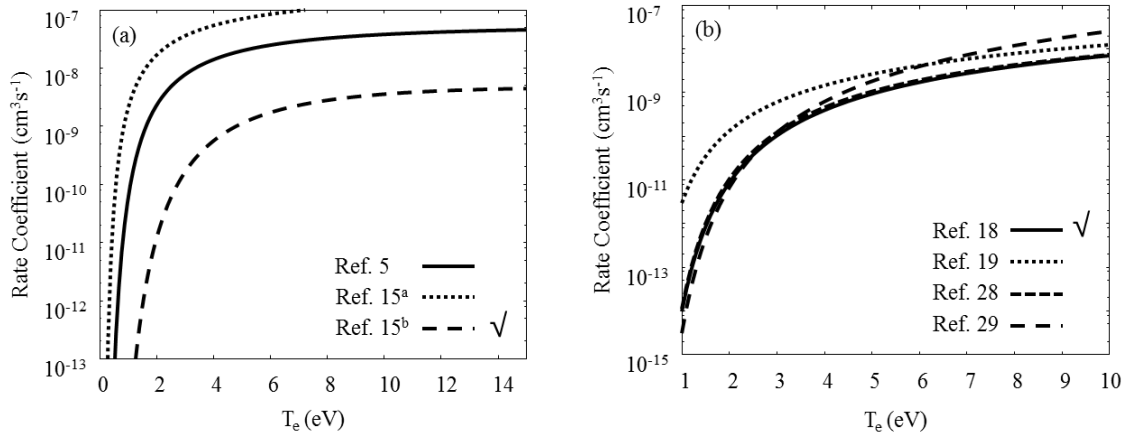


Figure 1. Various values of rate coefficients for (a)  $Cl+e \rightarrow Cl^*+e$  and (b)  $O_2+e \rightarrow O_2^*+2e$ . Here,  $\sqrt{\quad}$  means selected rate coefficient in this work.

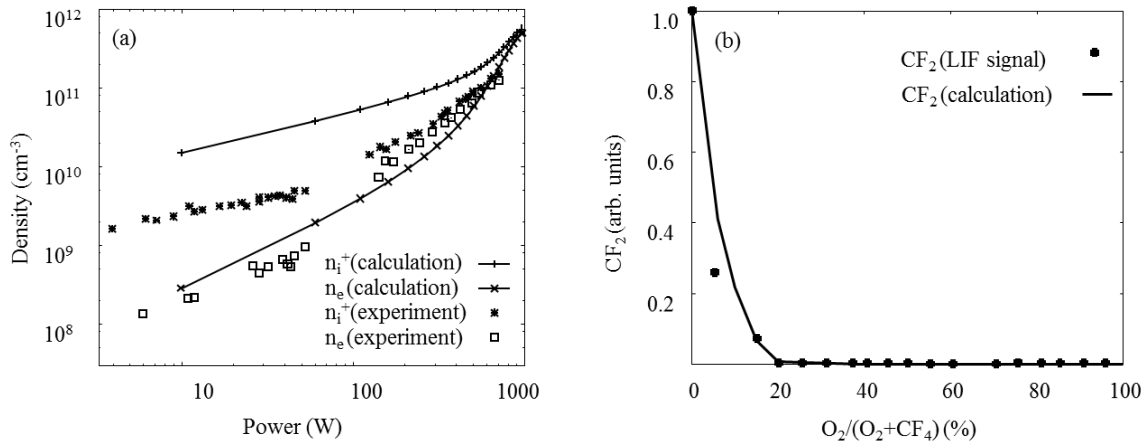


Figure 2. (a) Comparison between calculation and experimental results (calculation results of  $\text{---+}$ : Total positive ion and  $\text{---x}$ : Electron density, M. V. Malyshev experimental results of  $\text{---*}$ : Total positive ion and  $\text{---}\square$ : Electron density). (b) Dependence of  $CF_2$  density as function of fraction of  $O_2$  gas added to  $CF_4$  gas ( $\bullet$ : Experimental data in Ref. 2,  $\text{---}$ : calculated density).

의 실험 [30] 결과와 글로벌 모델을 사용하여 계산된 이온과 전자밀도를 비교한 그래프이다.  $Cl_2$  방전에서는 Fig. 1(a)의 여기 반응이 계산 결과에 중요한 반응이라는 것을 알 수 있었으며, Ref. 15<sup>b</sup>의 반응계수를 적용한 경우가 가장 차이가 작다는 것을 확인하였다.

Fig. 2(b)는  $CF_4/O_2$  방전에서  $CF_2$  밀도의  $O_2$ 와  $CF_4$  비율 의존성을 나타낸다. 전자밀도와 온도를 입력으로  $CF_2$  밀도를 계산하였고, 여기서 전자밀도와 온도의 측정치는 차단탐침과 정전탐침으로 측정된 값 [2]을 사용하였으며, 계산에 사용된 Fig. 1(b)의 반응계수 중 Ref. 18의 값은 가장 작은 실험치와의 차이를 보여주었다.

Fig. 3은  $Cl_2/Ar$  복합가스 방전에서  $Cl$  밀도의 전자밀도 의존성을 보여준다.  $Cl$  밀도는 전자밀도와 온도가 증가할

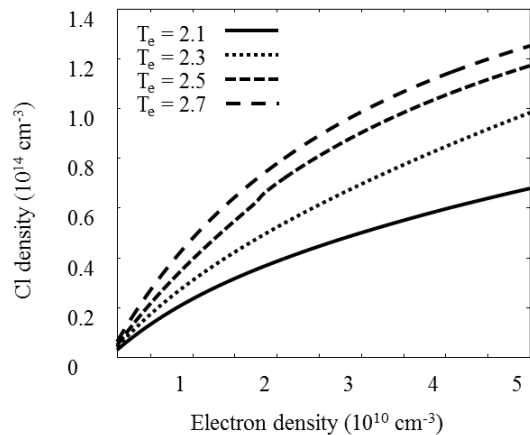


Figure 3. Dependence of  $Cl$  radical density on the electron density and temperature in  $Cl_2/Ar$  discharges.

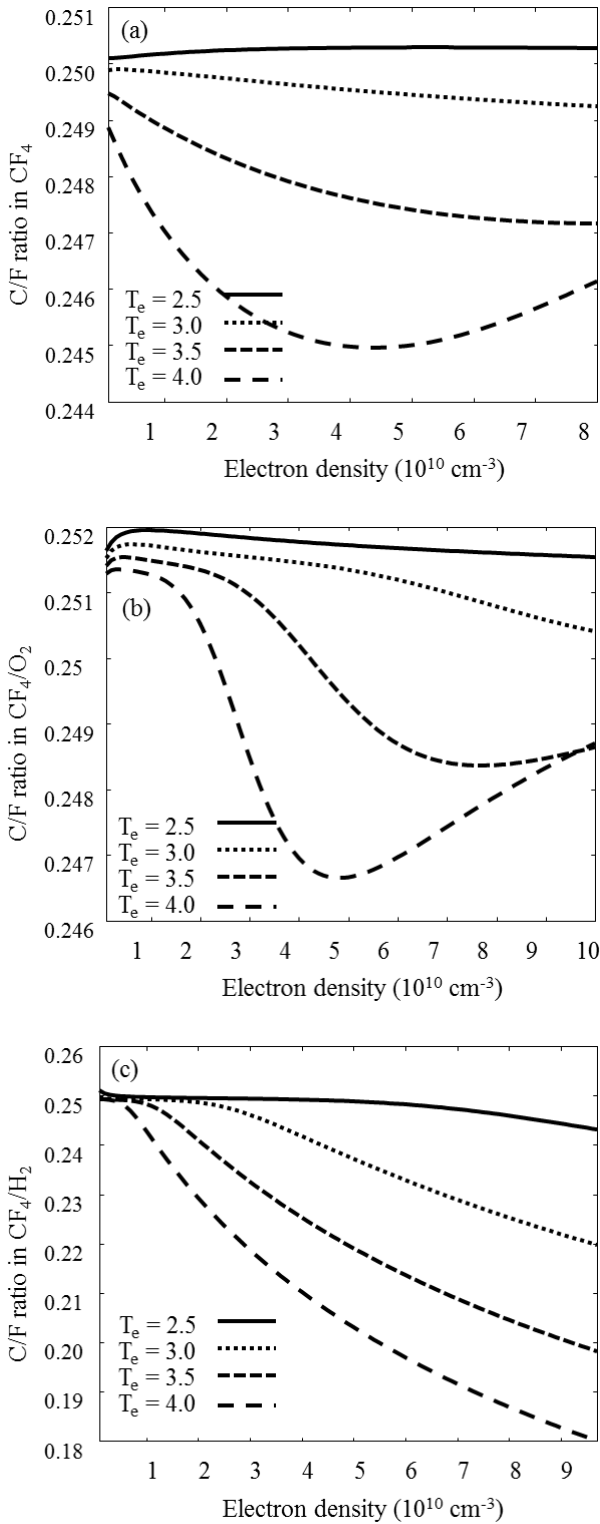


Figure 4. Dependence of C/F ratio on the electron density and temperature in (a) CF<sub>4</sub>, (b) CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> (CF<sub>4</sub> : O<sub>2</sub> = 1 : 1), and (c) CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> (CF<sub>4</sub> : H<sub>2</sub> = 1 : 1) discharges.

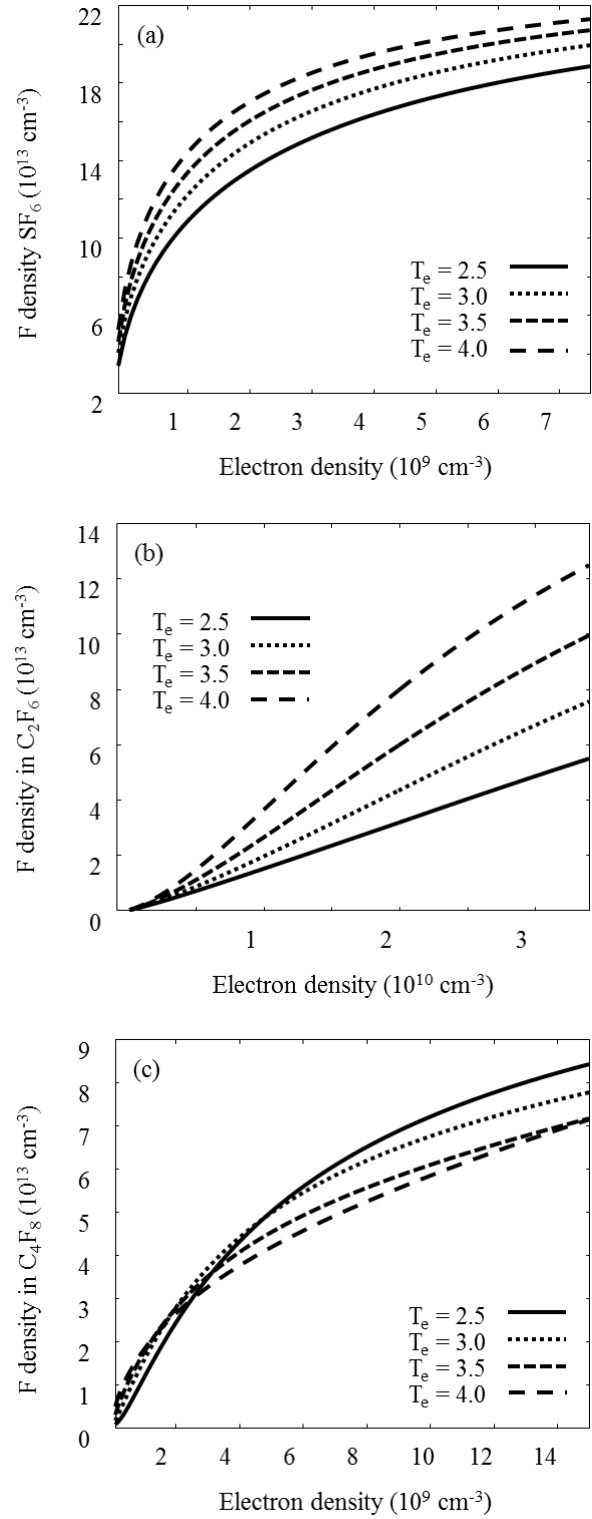


Figure 5. Dependence of F radical density on the electron density and temperature in (a) SF<sub>6</sub>, (b) C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, and (c) C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> discharges.

수록 증가하는 의존성을 보임을 알 수 있다.

CF<sub>4</sub> 및 O<sub>2</sub> 또는 H<sub>2</sub> 가스가 혼합한 경우의 C/F비의 전자 밀도 및 온도 의존성을 Fig. 4에서 확인하였다. Fig. 4(a)는 CF<sub>4</sub> 방전에서의 C/F 비의 전자밀도 및 온도 의존성을 보여주며 전자온도가 높을수록 C/F비가 감소하는 것을 알 수 있고, 전자밀도에 대해서는 일반적으로 감소하는 경향을 보이나 전자온도가 4 eV일 때는 C/F비가 최소가 되는 전자밀도가 존재하는 것을 알 수 있다. CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 복합가스 방전에서 C/F비의 전자밀도 및 온도 의존성의 경우 변화율의 차이는 있지만 CF<sub>4</sub> 방전인 경우와 C/F비의 크기는 비슷하다는 것을 Fig. 4(b)에서 알 수 있다. Fig. 4(c)는 CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> 방전에서 C/F비의 전자밀도 및 온도 의존성을 보여주며, 전자밀도와 온도의 증가에 대한 C/F비의 감소하는 변화율이 CF<sub>4</sub>와 CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 방전보다 상대적으로 크다는 것을 보여준다. 전자온도가 낮은 경우에는, C/F비의 전자밀도 의존성이 작은 것은 CF<sub>4</sub>와 CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 방전인 경우와 비슷하다는 것을 알 수 있다. 특히 C/F비의 최소가 존재하는 것은 F를 생성하는 CF<sub>x</sub> (x = 1 - 3)가 전자밀도의 증가에 따라 증가하다가 감소함을 보이는데 [2], 이에 따라 F 원자가 증가하다 감소하는 의존성을 보이는 결과로 보인다.

Fig. 5는 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, 그리고 SF<sub>6</sub> 방전에서 F 밀도의 전자밀도와 온도 의존성을 나타내는 그래프이다. Fig. 5(a)와 (b)는 각각 SF<sub>6</sub>와 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 방전에서 F 밀도의 전자온도와 밀도 의존성을 보여주며, 전자온도와 밀도가 증가할수록 F 밀도가 증가하는 것을 확인하였다. C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 방전에서 F 밀도의 전자온도 및 밀도에 대한 의존성이 전자밀도에 대해서 증가하고 전자온도에 대해서는 감소함을 보이는 것을 Fig. 5(c)를 통해 알 수 있다.

#### IV. 결 론

반도체 식각공정에서 주로 사용되는 Cl<sub>2</sub>/Ar, CF<sub>4</sub>, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, 그리고 SF<sub>6</sub> 가스의 방전에서 이온과 활성종 및 중성종의 전자밀도와 온도의 의존성을 분석하였다. 이를 위해 공간평균 유체방정식을 정상상태로 가정하여 상대적으로 측정이 용이한 전자밀도와 온도에 대한 식으로 표현하였고, 이 식을 반복대입법을 이용해 풀었다. 계산에 사용된 반응계수들은 계산 결과를 실험 결과와 비교하여 높은 일치도를 보이는 값들로 선택하였으며, 이

를 기초로 전자밀도와 온도에 대한 이온, 중성종 및 활성종 밀도의 의존성을 분석하였다.

개발된 프로그램은 상대적으로 측정이 용이한 전자밀도와 온도로부터 측정이 어려운 이온과 활성종 및 중성종의 밀도를 산출할 수 있으므로, 전산모사와 더불어 방전 시 생성되는 밀도 조성을 분석할 수 있는 유용한 도구 중 하나로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원의 2010 연합협동연구사업의 연구비 지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

- [1] W. K. Kim, M. H. Lee, C. W. Chung, and J. H. Kim, *Journal of the Korean Physical Society* **49**, 1687 (2006).
- [2] J. H. Kim, K. H. Chung, and Y. S. Yoo, *Journal of the Korean Physical Society* **47**, 249 (2005).
- [3] J. R. Roberts, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **100**, 353 (1995).
- [4] R. E. March, *Journal of Mass Spectrometry* **32**, 351 (1997).
- [5] S. Tinck, W. Boullart, and A. Bogaerts, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 1 (2008).
- [6] W. G. Lee, D. C. Kwon, and N. S. Yoon, *J. Korean Vacuum Soc.* **18**, 426 (2009).
- [7] S. H. Bae, D. C. Kwon, and N. S. Yoon, *J. Korean Vacuum Soc.* **17**, 426 (2008).
- [8] D. P. Lymberopoulos and D. J. Economou, *IEEE Transactions on Plasma Science* **23**, 573 (1995).
- [9] J. D. Bukowski, D. B. Graves, and P. Vitello, *J. Appl. Phys.* **80**, 2614 (1996).
- [10] P. Subramonium and M. J. Kushner, *J. Vac. Sci. Technol. A* **20**, 313 (2002).
- [11] A. M. Efremov, G. H. Kim, J. G. Kim, A. V. Bogomolov, and C. I. Kim, *Microelectronic*

- Engineering **84**, 136 (2007).
- [12] K. R. Ryan and I. C. Plumb, Plasma Chemistry and Plasma Processing **6**, 231 (1986).
- [13] T. Kimura and K. Ohe, J. Appl. Phys. **92**, 1780 (2002).
- [14] D. B. Hash, D. Bose, M. V. V. S. Rao, B. A. Cruden, M. Meyyappan, and S. P. Sharma, J. Appl. Phys. **90**, 2148 (2001).
- [15] E. Meeks and J. W. Shon, IEEE Transactions on Plasma Science **23**, 539 (1995).
- [16] <http://plasma.kisti.re.kr/>
- [17] A. V. Vasenkov, X. Li, G. S. Oehrlein, and M. J. Kushner, J. Vac. Sci. Technol. A **22**, 511 (2004).
- [18] Y. Itikawa, J. Phys. Chem. Ref. Data **38**, 1 (2009).
- [19] P. Ho, J. E. Johannes, R. J. Buss, and E. Meeks, J. Vac. Sci. Technol. A **19**, 2344 (2001).
- [20] M. J. Brunger, R. S. Brusa, S. J. Buckman, M. T. Elford, Y. Hatano, Y. Itikawa, K. Kameta, G. P. Karwasz, N. Kouchi, B. G. Lindsay, M. A. Mangan, and A. Zecca, *Photon and Electorn Interactions with Atoms, Molecules and Ions*, (Springer, New York, 2003), pp. 6-146.
- [21] [http://jila.colorado.edu/avp/collision\\_data/electroneutral/ELECTRON.TXT](http://jila.colorado.edu/avp/collision_data/electroneutral/ELECTRON.TXT)
- [22] R. R. Laher and F. R. Gilmore, J. Phys. Chem. Ref. Data **19**, 277 (1990).
- [23] Y. Itikawa and A. Ichimura, J. Phys. Chem, Ref. Data, **19**, 637 (1990).
- [24] S. S. Kim, *Theoretical studies of inductively coupled plasma source and enhanced plasma heating in a weak external magnetic field*, Ph. D. Thesis, (Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1999).
- [25] G. I. Font, W. L. Morgan, and G. Mennenga, J. Appl. Phys. **91**, 3530 (2002).
- [26] G. Kokkoris, A. Panagiotopoulos, A. Goodyear, M. Cooke, and E. Gogolides, J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 1 (2009).
- [27] Alfred Grill, *Cold Plasma in Materials Fabrication* (John Wiley & Sons, New York, 1994).
- [28] S. J. Kim, M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, and J. T. Gudmundsson, J. Vac. Sci. Technol. A **24**, 2025 (2006).
- [29] J. T. Gudmundsson, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, 328 (2002).
- [30] M. V. Malyshev and V. M. Donnelly, J. Appl. Phys. **90**, 1130 (2001).

## Numerical Investigation of Ion and Radical Density Dependence on Electron Density and Temperature in Etching Gas Discharges

Choong-Gi An<sup>a</sup>, Min-hae Park<sup>a</sup>, Hyung-Min Son<sup>a</sup>, Woo-Hyung Shin<sup>a</sup>, Deuk-Chul Kwon<sup>b</sup>,  
Shin-Jae You<sup>c</sup>, Jung-Hyung Kim<sup>c</sup>, and Nam-Sik Yoon<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>*School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763*

<sup>b</sup>*Convergence Plasma Research Center, National Fusion Research Institute, Daejeon 305-333*

<sup>c</sup>*Center for Vacuum Technology, Korea Research Institute for Standard and Science, Daejeon 305-306*

(Received July 25, 2011, Revised October 25, 2011, Accepted November 1, 2011)

Dependence of radical and ion density on electron density and temperature is numerically investigated for Cl<sub>2</sub>/Ar, CF<sub>4</sub>, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> and SF<sub>6</sub> discharges which are widely used for etching process. We derived a governing equation set for radical and ion densities as functions of the electron density and temperature, which are easier to measure relatively, from continuity equations by assuming steady state condition. Used rate coefficients of reactions in numerical calculations are directly produced from collisional cross sections or collected from various papers. If the rate coefficients have different values for a same reaction, calculation results were compared with experimental results. Then, we selected rate coefficients which show better agreement with the experimental results.

Keywords : Plasma, Radical composition, Etching process

\* [E-mail] nsyoon@cbnu.ac.kr