

# 1차원 유체모형을 이용한 CF<sub>4</sub> RF 플라즈마의 과도응답 특성

論 文

53C-1-5

## The Transient Response of CF<sub>4</sub> RF Plasmas Using One-dimensional Fluid Model

蘇 淳 烈\* · 林 暉 燮\*\*  
(Soon-Youl So · Jang-Seob Lim)

**Abstract** — CF<sub>4</sub> gas is one of the most useful gases in modern technologies for semiconductor fabrication. However, there are many problems which should be solved in order to fabricate semiconductor device, for example, etching speed drop due to ion charge-up and etching selectivity drop due to the high electron energy. One of useful method in order to suppress their damages above is pulsed-time modulated plasma (PM). However, transient responses of charged particles occur when the source power is turned-on and -off in PM method. To control plasma properties in detail, such a transient phenomenon must be investigated.

In this paper, we investigate CF<sub>4</sub> RF plasma properties under a one-dimensional fluid model. And also for dynamic and stable control of CF<sub>4</sub> plasmas, we investigated the transient behavior of the plasmas after step up or down of the amplitude of the power source voltage  $V_s(t)$ . Fundamental properties of transient CF<sub>4</sub> plasmas was discussed. Furthermore, we intend to discuss new method for pulsed-time plasma modulation.

**Key Words** : CF<sub>4</sub>, Modeling, Transient Response, RF plasma.

### 1. 서 론

CF<sub>4</sub> 가스는 플라즈마 에칭 및 CF필름 박막 증착 등 반도체 제조 공정에 유용하게 사용되는 기체 중의 하나이다<sup>[1,2,3]</sup>. 상대적으로 높은 에너지를 갖는 이온이 기판에 입사되어 에칭 과정을 형성하며, 이온이 기판에 입사되지 않을 때에는 CF<sub>2</sub> 및 CF의 중성 라디칼이 기판 표면에 박막을 형성한다. 이러한 이온 및 중성 라디칼은 CF<sub>4</sub> 기체가 전자에 의해 충돌 및 분해되어 형성되는 것으로부터 전자 충돌 특성에 관한 연구가 지금까지 상당히 수행되어 왔다<sup>[4]</sup>. 또한 전자 충돌 단면적을 이용한 정상상태의 CF<sub>4</sub> 플라즈마 특성 연구도 수행되어 왔다<sup>[5,6,7]</sup>. 그러나 이러한 가스를 이용한 반도체 프로세싱 분야에서는 기판에 축적되는 이온에 의해 기판의 절연 파괴 및 에칭 속도 저하 그리고 기판 주변에 높은 전자 에너지로 인한 선택성의 저하 등의 해결되어야 할 많은 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점을 보안하기 위해서 그림 1과 같이 플라즈마 펄스 변조 방식이 제안되어 왔다<sup>[8,9]</sup>.

이 방법에 의해 전하 축적 및 높은 전자 에너지의 문제점이 용이하게 제어할 수 있게 되었다. 그러나, 펄스적으로 파워를 인가할 때에 일어나는 과도적인 플라즈마의 움직임을 이해하고 분석하는 것이 보다 효율적으로 플라즈마를 제어하는 데에 필수 불가결하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 용량결합형 1차원 유체 모형을 이용한 수치해석 방법으로

부터 CF<sub>4</sub> 플라즈마의 운동을 이해하고, 전원 전압을 스텝적으로 변화시킴으로써 형성되는 각 입자들의 과도 응답 특성 및 완화 시간 특성, 그리고 펄스 변조에 의한 특성을 분석하고자 한다.

### 2. 모델링

#### 2.1 기본 방정식

본 시뮬레이션에 사용된 수치해석 방법으로서 1차원 유체 모델 방법을 채용하였다. 유체 모델은 각 하전입자의 연속 방정식, 전자 에너지 보존 방정식 및 포아송 방정식으로 구성되어 있다. 대전입자의 전송의 식을 아래에 표시하였다.

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

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

여기서  $j$ 는 전자, 정·부 이온을 나타낸다.  $N_j$ 는 각 하전입자의 밀도,  $S_j$ 는 전자 충돌 및 화학 반응에 의한 각 입자의 발생 및 소멸 항을 나타낸다. 또한  $\Gamma_j$ 는 입자속 (flux),  $D_j$ 는 확산 계수,  $W_j$ 는 이동속도를 나타낸다.

평균 전자 에너지 및 전계의 함수로 구해지는 각 파라메타를 결정하기 위해, 연속방정식에 에너지 보존식 및 포아송 방정식이 포함되어 있다.

$$\frac{\partial(\epsilon \cdot N_e)}{\partial t} + \frac{\partial q_e}{\partial x} = -\Gamma_e e E - N_e \cdot N k_L \quad (3)$$

\* 正 會 員 : 北海道大學校 電子情報工學科 Post-Doctor

\*\* 正 會 員 : 木浦海洋大學校 電子通信工學科 副教授

接受日字 : 2003년 8월 19일

最終完了 : 2003년 10월 25일

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

더기서,  $q_e$ 는 엔탈피 유속( $e$ 는 전자 전하),  $k_L$ 은 에너지 손실계수를 나타낸다.  $V$ 는 전극 포텐셜,  $\rho$ 는 실 전하 밀도,  $\epsilon_0$ 는 진공 유전율을 나타낸다.

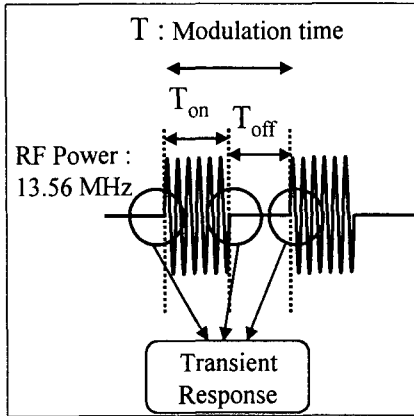


그림 1 펄스 변조 방식의 모식도.  
Fig. 1 The concept of pulsed-time modulated plasma method.

이에서 언급된 충돌 계수, 확산 계수 및 이동 속도 등의 파라메타 들은 전자 에너지 분포 함수(electron energy distribution function; EEDF)를 통하여, 볼츠만 방정식을 기본으로 한 전송 방정식으로부터 구하였다. 비록, 낮은 압력하에서는 쉬스 영역내에서 전자의 충돌이 빈약하게 형성되므로 몬티카르로 모델을 채택한 시뮬레이션이 효과적이지만, RF 플라즈마의 정상적인 측면에서 기본적인 특성 분석 및 예측에 유체 모델이 유용하게 이용되고 있다<sup>[10]</sup>. 충돌 단면적은 1993년 Itoh 등의 데이터를 사용하였으며<sup>[11]</sup> (그림 2 참조), 본 논문에 이용된 각 입자 들의 화학 반응 모델 및 하전 입자 들의 이동도, 확산 계수 들은 Mantzaris 등의 데이터를 이용하였다<sup>[12]</sup>.

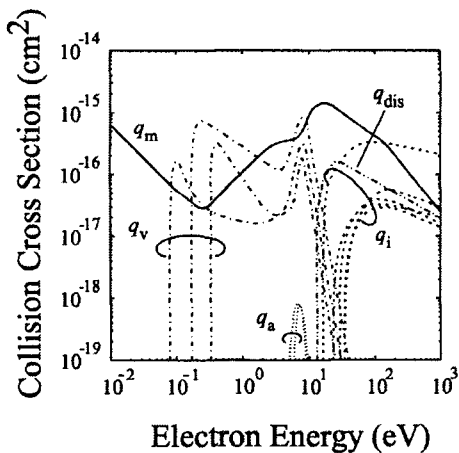


그림 2 CF<sub>4</sub> 가스의 전자 충돌 단면적 ( $q_m$ , 모멘트;  $q_i$ , 전리;  $q_a$ , 부착;  $q_v$ , 진동 여기; 그리고  $q_{dis}$ , 해리).  
Fig. 2 The present cross section set for CF<sub>4</sub>:  $q_m$ , momentum transfer;  $q_i$ , ionization;  $q_a$ , attachment;  $q_v$ , vibrational excitation; and  $q_{dis}$ , dissociation.

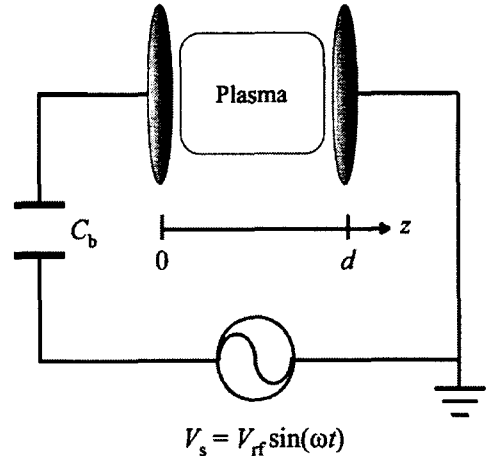


그림 3 CCP 모델의 외부 회로 및 방전 챔버의 모식도. 전극 간 거리  $d=2.0$ [cm], 블로킹 콘덴서  $C_b=8$ [pF], 가스압  $P=200$ [mTorr] 그리고 RF 주파수 13.56[MHz].  
Fig. 3 External circuit and electrode configuration of the present CCP model. The discharge gap  $d=2.0$ [cm], the blocking capacitor  $C_b=8$ [pF], the CF<sub>4</sub> gas pressure  $P=200$ [mTorr] and the frequency of the RF power source is 13.56[MHz].

### 2.2 챔버 및 외부회로

평행 평판 전극에 콘덴서를 직렬 연결한 용량결합형 플라즈마(CCP)를 채용한 모델을 그림 3에 나타내었다. 전극 간격 ( $d$ )은 2.0[cm], 방전 여기 RF 전원 주파수는 13.56[MHz], 전원 전압은 2.0[kV], 가스온도는 300[K]로 설정하였다. 또한 결합형 콘덴서 용량( $C_b$ )은 8[pF], 가스압력은 200[mTorr]로, 전극의 반경( $R$ )은 8[cm]로 설정하였다.

과도 응답 특성을 분석하기 위해 전원 전압의 진폭을 2.0 [kV]에서 2.3 [kV] ( $SR_{high}$ ), 1.0 [kV] ( $SR_{low}$ ) 그리고 0 [V] ( $SR_{zero}$ )로 변화시켰다. 각각의 전극간 전압( $V_g$ )의 진폭은 305 [V], 240[V] 그리고 0 [V]이다. 전원 전압은 연속파형을 인가하고 진폭의 변화를 통한 각 입자들의 과도 응답을 조사하였고, 펄스 변조 방식의 전원 전압은  $T_{on}$  및  $T_{off}$  시간을 각각 200 $\mu$ s로 설정하여 인가한 후에 각 입자의 특성을 분석하였다.

### 2.3. 경계조건 및 수치해석

식 (1)~(4)를 계산하기 위해, 간단한 SG법 (Scharfetter and Gummel's method)을 채용하였다<sup>[13]</sup>.

$$N(x) = \left( N_k - \frac{\Gamma_{k+\frac{1}{2}} h_k}{D_{k+\frac{1}{2}}} \cdot \int_0^x e^{\alpha \xi} d\xi \right) e^{-\alpha x} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\mu h_k E_{k+\frac{1}{2}}}{D_{k+\frac{1}{2}}}, \quad h_k = x_{k+1} - x_k, \quad \xi = \frac{(x-x_k)}{h_k} \quad (6)$$

전극방향으로 입사하는 전자속은 전자 열속도의 함수로 결정되어진다. 그리고, 전극 면으로 향한 전자는 전부 흡수되는 것으로 가정하였다. 전극면 에너지 및 전자 2차 방출 계수를

0.5 [eV], 0.01로 설정하였으며, 이온 유속에 의한 2차 방출 전자밀도는 경계 면에서 다음과 같이 구해진다.

$$N_{e2nd} = \frac{\Gamma_p \cdot \gamma}{v_{e,th}} \quad (7)$$

본 연구에서는 전자의 충돌에 의한 전리 반응( $\alpha$  영역)으로, 플라즈마가 유지되는 것으로 가정하였다<sup>[14]</sup>. 또한 방출된 2차 전자 밀도는 경계 조건으로 고려되어졌다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

#### 3.1 1차원 대칭구조의 정상상태

그림 4는 전원 전압 2.0 [kV]에서의 정상 상태의 전자, 이온, 전극간 전계 및 실 전하 밀도의 시·공간분포를 보여주고 있다. 일반적으로 전자는 가볍고 빠른 운동의 특성을 가지고 있으므로, 상대적으로 RF 주기에 대해 전압의 변화가 크게 형성되는 전극면 부근에서 전자 밀도의 움직임이 매우 활발하게 형성되는 것을 알 수 있다. 또한 전극간의 중앙 부근에서는 양 전극 면으로부터 확산에 의해 전자들이 유입되므로 상대적으로 시간 변화에 대해 움직임이 활발하지 못하다 (그림 4의 (a)). 이온은 전자에 비해 무겁고 RF의 변화에 대한 응답 속도가 늦기 때문에 시간 변화에 따른 이온 수밀도의 움직임은 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있다 (그림 4의 (b)). 이러한 특성으로부터 전극 면의 부근에서는 이온의 밀도가 전자 및 부 이온의 밀도보다 높게 형성됨으로써 그림 4

의 (c)와 같이 높은 전계를 형성하고 (쉬스 영역), 전극간 중앙 부근에서는 정·부 전하의 밀도가 거의 같은 즉, 전기적 중성인 플라즈마 (벌크 영역)를 형성하게 된다 (그림 4의 (d)). 따라서, 쉬스영역의 큰 공간 전계를 이용하여, 반도체 표면의 증착 및 에칭을 효과적으로 처리할 수 있다.

#### 3.2 쉬스 영역에서의 과도 응답 특성

그림 5는 전원 전압을 2.0[kV]에서 2.3[kV], 1.0[kV] 그리고 0[V]로 스텝적으로 변화시켰을 때의 쉬스 영역에서의 전자, 정·부 이온 및 전자 에너지의 과도 응답 특성을 나타내고 있다. 각 데이터는 RF 1 사이클( $t/T$ )당 최대치를 표시하였으며, 쉬스 영역의 특성과 벌크 영역으로부터의 영향을 고려하여 전극면으로부터  $z=0.2$  [cm]인 영역을 선택하였다. 전원전압을 증가시키면 전극면 부근에서의 전자 에너지가 증가하게 되며, 이로 인해 모체 가스와의 전자 전리 충돌에 의해 전자 및 정 이온의 밀도가 증가하는 것을 알 수 있다.

그러나 시간이 지나감에 따라 전자는 충돌에 의해 에너지를 잃게 되고 각 전하의 밀도는 또다른 정상 상태를 형성하게 된다. 전원 전압을 1.0[kV]로 감소시키면, 전극 면 부근에서는 전자의 에너지가 급속히 저하되면서 각 입자의 밀도도 감소하게 된다. 그러나 벌크 영역으로부터 확산에 의해 유입되는 각 입자의 밀도에 의해서 증가하게 되고, 시간이 지남에 따라 안정 상태를 유지하게 된다. 전원 전압을 0[V]로 급감시키면, 수 RF 주기 동안에 전하 밀도가 급속히 감소되지만, 상대적으로 높은 밀도를 형성하는 벌크 영역으로부터 각 입자가 유입된다. 따라서 입자의 수밀도가 증가하면서 감소하는 특성을 나타내고 있다.

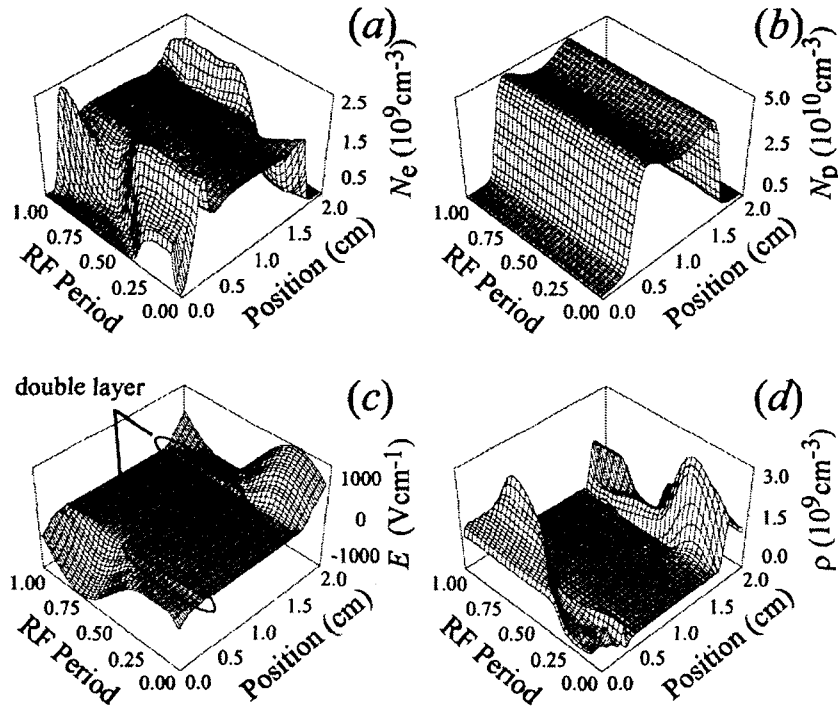


그림 4. 주기적 정상 상태의 RF 시간 변화에 대한 전자, 이온, 공간 전계 및 실 전하 밀도.

Fig. 4. Periodic steady-state profiles of (a) electron concentration  $N_e$ , (b) total positive ions  $N_p$ , (c) electric field  $E$ , and (d) net charge density  $\rho$  at  $V_{rf}=2.0$ [kV].

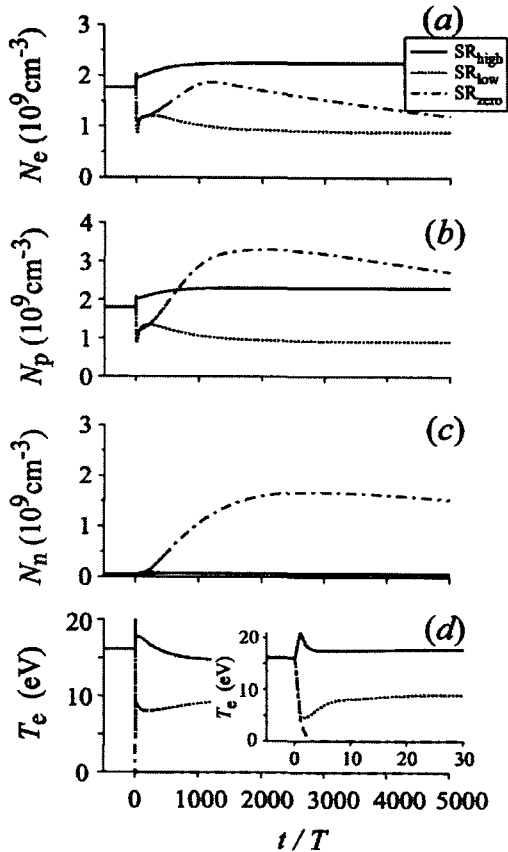


그림 5. 스텝적으로 전원 전압을 변화시킨 후, 쉬스 영역에서의 (a) 전자 수밀도, (b) 정 이온 수밀도, (c) 부 이온 수밀도 그리고 (d) 전자 에너지의 과도 응답 특성.

Fig. 5. Transient behavior of (a) electron concentration  $N_e$ , (b) total positive ions  $N_p$ , (c) total negative ions  $N_n$ , and (d) electron temperature  $T_e$  at  $z=0.2[\text{cm}]$  during 5000 RF cycles ( $t/T$ ).  $SR_{\text{high}}$  indicates step-up from  $V_{\text{rf}}=2.0[\text{kV}]$  to  $2.3[\text{kV}]$ ;  $SR_{\text{low}}$  and  $SR_{\text{zero}}$  indicate step-down from  $V_{\text{rf}}=2.0[\text{kV}]$  to  $1.0[\text{kV}]$  and  $0[\text{V}]$ , respectively.

### 3.3 벌크 영역에서의 과도 응답 특성

그림 6에서는 벌크 영역( $z=1.0 [\text{cm}]$ )에서의 전자, 정·부 이온 및 전자 에너지의 과도 응답 특성을 나타내고 있다. 전원 전압을 증가시키면 쉬스 영역에서의 전자 유입에 의해 전자의 밀도는 일단 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 이온의 경우는 수 RF 주기 동안에 잠시 증가하지만, 상대적으로 부착 및 재결합 과정을 통하여 이온의 밀도는 감소하게 된다. 이러한 특성은 Biebericher의 실험치와 일치하는 결과를 보여 주고 있다<sup>[15]</sup>.

전원 전압을  $1.0[\text{kV}]$ 로 감소시키면, 각 입자는 일단 확산 과정을 통하여 전극 면으로 흘러 나가게 되고 입자의 밀도는 감소하게 된다. 그러나 전극간에는 방전 유지 전압이 인가되고 있기 때문에 빠른 시간 내에 또 다른 정상 상태로 수축하게 된다. 전원 전압이  $0[\text{V}]$ 로 스텝 변화되면, 전극간의 전자

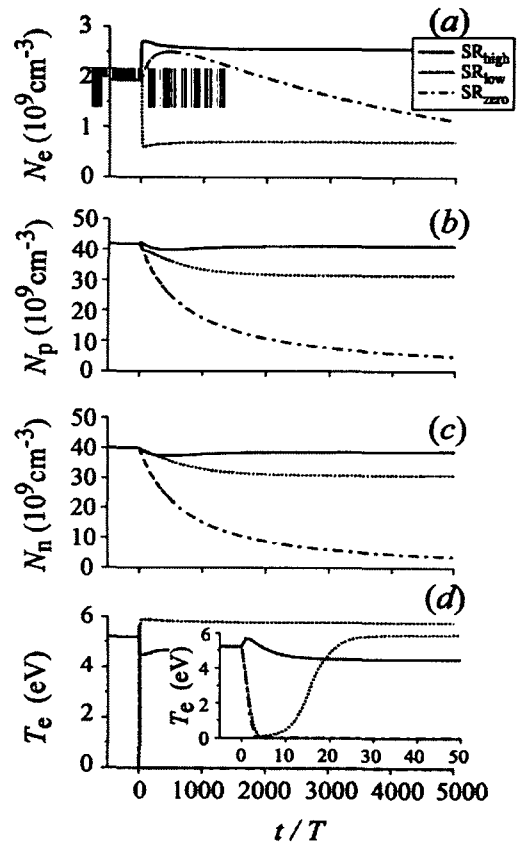


그림 6. 전원 전압의 변화에 대한 벌크 영역에서의 (a) 전자 수밀도, (b) 정 이온 수밀도, (c) 부 이온 수밀도 그리고 (d) 전자 에너지의 과도 응답 특성.

Fig. 6. Transient behavior of (a) electron concentration  $N_e$ , (b) total positive ions  $N_p$ , (c) total negative ions  $N_n$ , and (d) electron temperature  $T_e$  at  $z=1.0[\text{cm}]$  during 5000 RF cycles ( $t/T$ ).  $SR_{\text{high}}$  indicates step-up from  $V_{\text{rf}}=2.0[\text{kV}]$  to  $2.3[\text{kV}]$ ;  $SR_{\text{low}}$  and  $SR_{\text{zero}}$  indicate step-down from  $V_{\text{rf}}=2.0[\text{kV}]$  to  $1.0[\text{kV}]$  and  $0[\text{V}]$ , respectively.

온도는  $0[\text{eV}]$ 에 가깝게 감소되고 각 입자는 전극면을 향하여 확산에 의해 감소된다. 그러나 직렬 연결된 콘덴서가 방전에 의해 또 다른 전원으로 작용하게 됨으로써, 전자는 DC방전과 같이 전극 면에서 전극 중앙으로 이동하게 된다. 따라서 일정한 시간 동안 전자의 밀도는 증가하면서 확산을 통하여 감소되는 것을 알 수 있다.

### 3.4 펄스 변조에 의한 과도 응답 특성

플라즈마 프로세스에서는 전하 축적 문제 및 높은 선택성을 좌우하는 전자 에너지를 제어하기 위해서 펄스 변조 방식을 통하여 해결하고 있다. 이는 3.2 및 3.3 절에서 소개한 바와 같이 전원 전압을  $0[\text{V}]$ 로 급감시키면 전극간의 전자 에너지는 거의  $0[\text{eV}]$ 로 유지되고 상대적으로 이온의 에너지도 급감하게 되어 상기의 문제점을 제어한다. 그러나 앞 절에서

보여진 결과로부터 전원 전압을 0[V]가 아닌 일정한 전압을 인가한 경우, 각 전하의 밀도가 빠른 완화속도로 수축하게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 절에서는 보다 다양한 전원 전압의 스텝 변화에 대해 형성되는 과도 응답 특성을 조사하였다.

그림 7에서 각 전원 전압을 1.0[kV], 50[V], 20[V] 그리고 0[V]로 스텝 변화하였을 때의 전자 및 이온, 그리고 전자 에너지의 응답 특성을 보여주고 있다. 이 결과로부터 전원 전압을 50[V]로 인가하였을 때에 각 하전 입자의 수밀도가 보다 빠르게 수축하고, 전자의 에너지도 0[eV]에 가깝게 급감하는 것을 볼 수 있다. 그러나 플라즈마 에칭 프로세스에서는 밀도 뿐만 아니라 각 입자의 입사 속도 즉, 입자 유속(flux)의 역할도 매우 중요하다 할 수 있다. 따라서, 그림 8에 50[V]와 0[V]에 대한 펄스 변조 시간을 3000 RF 주기(약 200 $\mu$ s)로 설정하여 이온의 밀도 특성 및 유속 특성을 조사하였다. 50[V]로 설정한 경우가 이온의 밀도가 보다 빨리 수축하는 것을 알 수 있으며, 이온의 유속도 0[V]로 설정한 결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 전극간에 어느 정도의 전압이 인가되면, 0[V]보다는 각 입자의 움직임이 활

발하게 되고, 또한 기체 방전을 유지할 수 있는 파워는 되지 못하기 때문에 전자의 에너지는 거의 0[eV]로 유지되는 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 펄스 변조 방식에 도입된 파워 오프의 기간 동안을 방전이 지속되지 못하는 전압으로 대체함으로써 보다 효율적으로 각 입자의 움직임을 제어할 수 있을 것으로 예측된다.

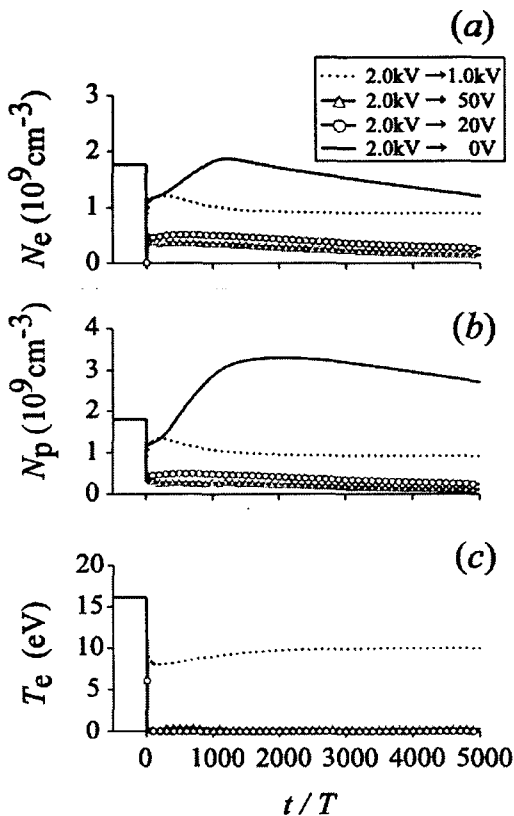


그림 7. 다양한 전원 전압의 스텝 변화에 대한 쉬스영역에서의 (a) 전자 수밀도, (b) 정 이온 수밀도 및 (c) 전자 에너지의 과도 응답 특성.

Fig. 7. Transient behavior on various conditions of power source voltage of (a) electron concentration  $N_e$ , (b) total positive ions  $N_p$ , and (c) electron temperature  $T_e$  at  $z=0.2$ [cm] during 5000 RF cycles ( $t/T$ ).

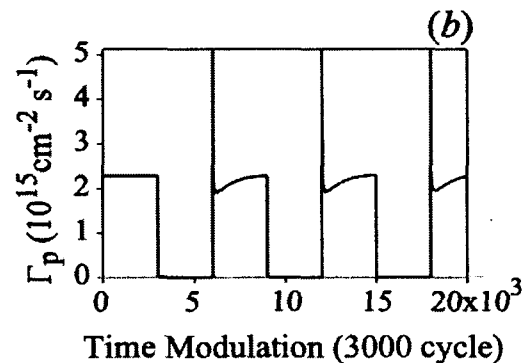
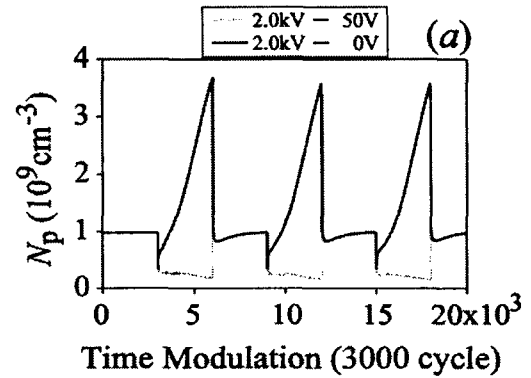


그림 8.  $z=0.06$  [cm]에서의 변조 시간을 RF 3000 사이클로 설정한 펄스 변조 플라즈마의 (a) 정 이온 수밀도 및 (b) 유속의 응답 특성.

Fig. 8. Pulsed-time plasma response of (a) total positive ions  $N_p$  and (b) total positive ions flux ( $\Gamma_p$ ) at 0.06 [cm]. The pulsed-time is set to be 3000 RF cycles (about 200 $\mu$ s).

#### 4. 결 론

CF<sub>4</sub> RF 비평형 플라즈마를 1차원 유체 모델을 통하여 시뮬레이션을 행하였고, 전원 전압을 스텝적으로 변화시키면서 각 입자의 과도 응답 특성을 분석하였다.

정상 상태에서는 전자와 이온의 시간 변화에 대한 움직임을 분석함으로써, 전극간의 공간 전계 및 전위 형성과 CF<sub>4</sub> 플라즈마를 구성하는 각 입자들의 운동 및 형성을 이해할 수 있었다.

과도 응답 특성을 초기 응답 과정과 장시간 완화 과정으로 구분하여 분석할 수 있었다. 초기 응답 과정은 전자의 이동 속도와 충돌에 의해서 수 RF 주기 동안에 형성되며, 장시간

완화 과정은 각 입자의 확산 및 화학 반응에 의해 형성되는 것을 알 수 있었다. 전자 에너지를 제어하기 위해 전원 전압을 0[V]가 아닌 방전이 유지되지 못할 전압을 인가함으로써, 각 입자의 완화 시간이 빠르게 형성되고 전자 에너지도 0 [eV]에 가깝게 유지할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Mark A. Sobolewski, Yichen Wangm and Amanda Goyette, "Measurements and modeling of ion energy distributions in high-density, radio-frequency biased CF<sub>4</sub> discharges", J. Appl. Phys., Vol. 91 No. 10, pp. 6303 (2002)

[2] Brian K. McMillin and Michael R. Zachariah, "Two-dimensional imaging of CF<sub>2</sub> density by laser-induced fluorescence in CF<sub>4</sub> etching plasmas in the gaseous electronics conference reference cell", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol.15 No. 2, pp. 230 (1997)

[3] T. Kimura and K. Ohe, "Model and probe measurements of inductively coupled CF<sub>4</sub> discharges", J. Appl. Phys., Vol.92 No.4, pp. 1780 (2002)

[4] L.G. Christophorou, J.K. Olthoff and M.V.V.S. Rao, "Electron Interactions with CF<sub>4</sub>", J. Phys. and Chem. Ref. Data, Vol.24 No.5, pp. 1341 (1996)

[5] Nikolaos V. Mantzaris, Andreas Boudouvis and Evngelos Gogolides, "Radio-frequency plasmas in CF<sub>4</sub>: Self-consistent modeling of the plasma physics and chemistry", J. Appl. Phys., Vol.77 No.2, pp. 6169 (1995)

[6] S. Segawa, M. Kurihara, N. Nakano and T. Makabe, "Dependence of Driving Frequency on Capacitively Coupled Plasmas in CF<sub>4</sub>", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, pp. 4416 (1999)

[7] 김승범, 김창일, "Ar/CF<sub>4</sub> 고밀도 플라즈마에서 (Ba,Sr) TiO<sub>3</sub> 박막의 식각 메카니즘", 전기학회논문지, 49C권 5호, pp. 265 (2000)

[8] 최영욱, 이홍식, 임근희, 김태희, 백민수, 장길홍, "펄스 플라즈마 반응기의 모델링에 의한 해석", Trans. KIEE. Vol. 49C, No. 1, pp. 30 (2000)

[9] Seiji Samukawa and Tetsu Mieno, "Pulsed-time modulated plasma discharge for highly selective, highly anisotropic and charge-free etching", Plasma Sources Sci. Technol. Vol 5, pp. 132 (1996)

[10] J. P. Boeuf and L.C. Pitchford, "Two-dimensional model of a capacitively coupled rf discharge and comparisons with experiments in the Gaseous Electronics Conference reference reactor", Phys. Rev. E. Vol. 51, No. 2, pp. 1376 (1995)

[11] H. Itoh, Y. Matsumura, K. Satoh, Y. Nakao and H. Tagashira, "Development of Electron Swarms in CF<sub>4</sub>", Proc. XXI. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, pp. 385 (1993)

[12] E. Gogolides, M. Stathakopoulos and A. Boudouvis, "Modelling of radio-frequency plasmas in...

tetrafluoromethane(CF<sub>4</sub>): the gas phase physics and the role of negative ion detachment", J. Phys. D; Appl. Phys. Vol. 27, pp. 1878 (1994)

[13] A. A. Kulikovsky, "A More Accurate Scharfetter Gummel Algorithm of Electron Transport for Semiconductor and Gas Discharge Simulation", J. Com. Phys., Vol.119, pp. 149 (1995)

[14] Ph. Belenguer and J.P. Boeuf, "Transition between different regimes of rf glow discharge", Phys. Rev. A, Vol. 41 No. 8, pp. 4447 (1990)

[15] A. C. W. Biebericher, J. Bezemer, W. F. van der Weg, and W. J. Goedheer, "Deposition rate in modulated radio-frequency silane plasmas", Appl. Phys. Lett., Vol.76, pp. 2002 (2000)

저 자 소 개



소순열 (蘇淳烈)

1996년 2월 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1998년 2월 동교 대학원 석사과정 졸업. 2003년 3월 홋카이도대학교 대학원 박사과정 졸업(공박). 현재 홋카이도대학교 공과대학 계약연구원.

E-mail : syso@mars-ei.eng.hokudai.ac.jp



임장섭 (林障燮)

1989년 2월 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 2월 동교 대학원 전기공학과 석사과정 졸업. 1996년 2월 동교 대학원 전기공학과 박사과정 졸업. 1994년 2월-1996년 2월 일본 아키타대학 연구생. 1996년 8월-현재 목포해양대학교 해양전자통신공학부 부교수

Tel : 061)240-7122

E-mail : janylim@mmu.ac.kr