

## 드라이 에칭 프로세스의 플라즈마 쉬스 모델링

유광준, 이세연, 박일한  
성균관대학교

### Plasma sheath modeling of Dry etching process

Gwang-jun Yu, Se-yeon Lee, Il-han Park  
Sungkyunkwan University

**Abstract** - 반도체 제조공정에서 널리 쓰이고 있는 플라즈마 에칭프로세스는 기판의 물질을 선택적으로 제거할 때 사용하는 방법이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 플라즈마 에칭공정을 예측하기 위한 많은 노력이 행하여져 왔다. 그러나 많은 연구에서 플라즈마와 쉬스영역을 따로 모델링하거나 PIC-MC 방법을 이용하였다.[1] 본 논문에서는 반도체 에칭 공정에 사용되는 플라즈마와 플라즈마 쉬스를 상용 코드인 Multiphysics를 사용하여 동시에 시뮬레이션하고 실험결과와의 일치성을 보이고자 한다.

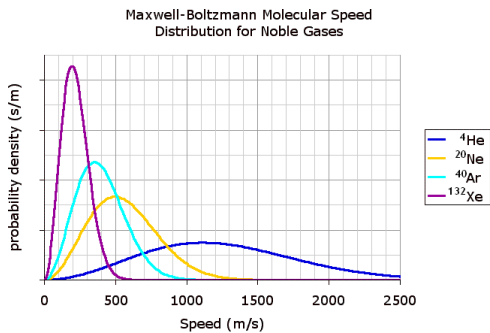
#### 1. 서 론

플라즈마 에칭공정은 전자기적인 특성과 플라즈마 구성요소인 이온과 중성원소, 전자의 운송역학적 특성, 그리고 각 구성요소의 에너지 분포 등 많은 복합적인 물리현상의 결과이다. 먼저 전자기장 필드계산을 위하여 Maxwell 방정식, Electrostatic Potential 계산을 위한 Poisson's 방정식, Drift Diffusion을 계산하기 위하여 위치에 따른 전자밀도, 전자의 운송역학적 특성과 충돌에 의한 에너지 전이를 계산을 해야 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 플라즈마의 발생

플라즈마의 구성원인 전자, 중성원소, 이온은 탄성과 비탄성충돌을 통해 에너지를 전이한다. 이 때 각 원소가 갖는 에너지를 속도에 의하여 표현할 수 있다. 플라즈마 구성원들은 <그림 1>과 같은 맥스웰-볼츠만 분포를 따른다. 식(1)은 구성원의 속도에 따른 맥스웰-볼츠만 분포를 나타낸다. 식(2)는 맥스웰-볼츠만 분포에서 평균속도를 나타낸다.

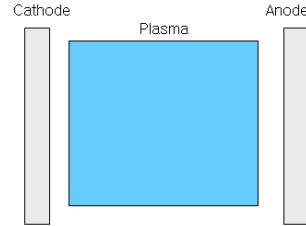


<그림 1> 속도에 대한 맥스웰-볼츠만 분포

$$dn = \frac{4n}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv \quad \text{-----(1)}$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} v dn \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8kt}{\pi m}} \quad \text{-----(2)}$$

<그림 2>와 같은 반응기 내부의 시드(seed) 전자와 이온이 전기장에 의하여 가속된다. 전자의 질량은 중성원자나 이온의 질량에 비하여 매우 작다. 그래서 전자는 원자나 이온과 충돌시 방향전환만 발생할 뿐, 감속되지 않고 전기장에 의하여 지속적으로 가속이 이루어진다. 하지만 이온과 중성원자는 충돌현상에 의하여 지속적으로 에너지를 전이하여 더 이상 가속되지 못한다. 전자의 운동에너지가 중성원자의 이온화에너지에 도달하면 충돌에 의하여 원자를 이온화시켜 새로운 전자를 발생시키거나 원자를 여기(excitation)시킨다.

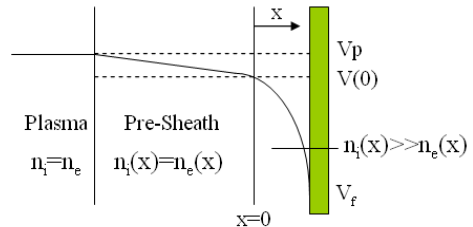


<그림 2> 플라즈마 에칭공정을 위한 반응기 내부

전자와 이온의 상대적인 질량차로 인하여 전자플럭스가 이온플럭스에 비해 큰 값을 갖게 된다. 따라서 반응기 내부 벽면은 음으로 대전된다. 벽면에 형성된 음전위에 의하여 점차 전자의 플럭스가 줄어들고 이온의 플럭스가 증가하게 된다. 결국 전자와 이온의 플럭스가 동일해지는 시점에서 벽면은 더 이상 음으로 대전되는 것을 멈추게 된다. 이러한 현상에 의해 플라즈마는 접하고 있는 어떠한 표면보다도 상대적인 양전위를 갖게 된다.

##### 2.2 쉬스의 형성

쉬스는 플라즈마와 벽면사이의 경계지역으로 에칭공정에서는 음극과 양극에 각각 쉬스가 형성된다. <그림 3>은 음극지역에 형성된 쉬스를 나타낸다.



<그림 3> 플라즈마-쉬스 경계지역의 밀도와 전위

기판의 상대적 음전위로 인해 쉬스의 전자밀도는 지수적으로 감소하고 이온밀도는 선형적으로 감소하여 쉬스는 양전하 공간이 된다. 따라서 쉬스내부에는 양전하에 의한 전기장이 형성된다.[2]

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{-----(3)}$$

$$E = -\nabla V$$

이 때, 플라즈마와 기판사이의 전위차가  $V_p - V_f$  이므로 쉬스를 지나 기판에 도달하는 전자의 상대밀도는 식(1)을 이용하여 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{n_e'}{n_e} = \exp\left[-\frac{e(V_p - V_f)}{kT_e}\right] \quad \text{-----(4)}$$

$n_e'$  : 플라즈마내부 전자밀도  
 $n_e$  : 기판에 도달하는 전자밀도  
 $n_i$  : 기판에 도달하는 이온밀도

쉬스와 플라즈마 사이에는 쉬스층이 지역(pre-sheath)이 존재한다. 쉬스층이 지역은 쉬스전위가  $kT/2e$  만큼 플라즈마 내부로 새어 들어간 영역으로 이온과 전자의 밀도가 서로 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_i U(0)^2 &= eV(0) \\ V(0) &= \frac{m_i U(0)^2}{2e} = \frac{m_i}{2e} \times \sqrt{\frac{kTe}{m_i}}^2 \\ V(0) &= \frac{kT_e}{2e} \end{aligned} \quad \text{-----}(5)$$

또한 식(1)을 이용하여 계산할 경우, 쉬스에 들어오는 전자-이온의 밀도는 플라즈마 영역의 전자-이온밀도의 0.6배임을 알 수 있다.

$$n_e(0) = n_e \exp\left(-\frac{eV(0)}{kT_e}\right) = n_e \exp\left(-\frac{1}{2}\right) = 0.6n_e \quad \text{-----}(6)$$

기관에 입사하는 전자와 이온의 랜덤플럭스가 서로 같으므로 식(1),(5),(6)을 식(7)에 대입하여 정리하면 플라즈마와 쉬스에 발생하는 전류를 식(8)로 나타낼 수 있다. 식(8)은 플라즈마와 쉬스의 전위가 전자온도와 전자와 이온의 질량비로 표현 가능함을 의미한다.

$$\begin{aligned} \frac{\overline{n_e v_e}}{4} &= \frac{\overline{n_i v_i}}{4} \quad \text{-----}(7) \\ -\frac{e(V_p - V_f)}{kT_e} &= \ln\left(2.4 \left(\frac{kT_e}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{v_e}\right) \\ V_p - V_f &= -\frac{kTe}{e} \ln\left(2.4 \left(\frac{kT_e}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\pi m_e}{8kT_e}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \\ &= -\frac{kTe}{e} \ln\left(\frac{2.3m_e}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad \text{-----}(8)$$

### 2.3.1 Hydrodynamic Equation

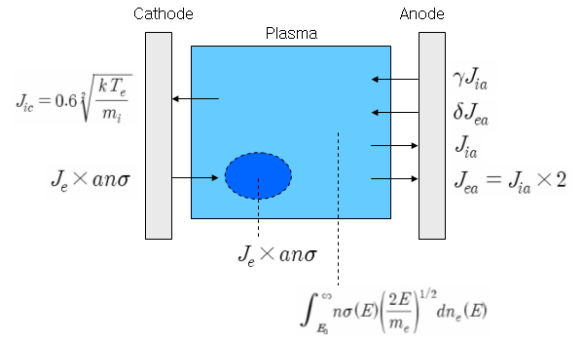
식(9),(10)은 이온과 전자의 운동량전달에 관한 식이며, 식(11),(12)는 전자와 이온의 보존에 관한 식이며, 식(13)은 전자와 이온의 밀도차이에 의하여 발생하는 전기장에 관한 식이다.[3,4,5]

$$\begin{aligned} Mv_i \nabla v_i + e \nabla \phi + (kT_i/n_i) \nabla n_i + Mz v_i (n_e/n_i) + F_p &= 0 \quad \text{-----}(9) \\ Mv_e \nabla v_e - e \nabla \phi + (kT_e/n_e) \nabla n_e + Mz v_e + F_e &= 0 \quad \text{-----}(10) \\ \nabla(n_e v_p) &= zn_e \quad \text{-----}(11) \\ \nabla(n_e v_e) &= zn_e \quad \text{-----}(12) \\ \Delta \phi &= 4\pi e(n_e - n_p) \quad \text{-----}(13) \end{aligned}$$

- $e$ : 전자의 전하
- $m$ : 전자 질량
- $M$ : 이온 질량
- $T_i$ : 이온 온도
- $T_e$ : 전자 온도
- $V_i$ : Hydrodynamic 이온 속도
- $V_e$ : Hydrodynamic 전자 속도
- $n_i$ : 이온 밀도
- $n_e$ : 전자 밀도
- $z$ : 이온화 주파수
- $k$ : 볼츠만 상수
- $F_i$ : 중성 원자와 이온의 충돌 주파수
- $F_e$ : 중성 원자와 전자의 충돌 주파수

### 2.3.2 전류 조건

쉬스전위에 의하여 음극으로 이온전류가 발생하며 이온이 음극에 충돌하여 이차전자가 방출된다. 쉬스전위에 의하여 이차전자는 플라즈마 쪽으로 가속되어 전자전류를 형성한다. 가속된 이차전자는 쉬스에서 중성 원자와 충돌을 통해 선형적으로 증식된다. 플라즈마에 입사한 이차전자는 쉬스 전위에 의하여 충분히 가속된 상태이며 플라즈마 내부의 이동 거리에 비례하여 직선적인 전자증식을 계속하게 된다. 하지만 이차전자에 의한 전자증식만으로는 플라즈마 유지에 필요한 이온화 수준에 도달할 수 없다. 플라즈마 유지에 필요한 나머지 전자증식은 플라즈마 내부 열전자에 의하여 발생하게 된다. <그림3>은 플라즈마 경계 및 내부에서 발생하는 전류를 나타내고 있다.



γ: 이온의 이차전자 방출계수  
a: 플라즈마 내부 전자의 이동길이  
n: 중성 원자 밀도  
σ: 중성 원자 충돌 단면적  
L: 기관에서 플라즈마까지 거리

<그림 3> 플라즈마의 전류 경계조건

### 2.3.3 플라즈마 유지 조건

지속적인 확산과 이동에 의하여 플라즈마 내부의 전자와 이온이 소모된다. 플라즈마 유지를 위해서는 소모된 양과 같은 전자와 이온이 새로 생성되어야 한다. 이는 타운센트의 이온화수식에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n_e \rightarrow \infty ; 1 = \gamma(e^{ad} - 1)$$

## 3. 결 론

플라즈마와 쉬스의 모델링을 위하여 Hydrodynamic Equation을 적용하고 전류밀도와 플라즈마 유지조건을 경계조건으로 사용하고자 한다.

## [참 고 문 헌]

- [1] V. Sukharev, "Multiscale modeling of plasma etch processing", Vacuum, 65, 281-289, 2002
- [2] 염근영, 플라즈마 식각기술, 119-161, 2006
- [3] Natalia Sternberg, Valery A. Godyak, "Approximation of the Plasma problem by the plasma and the sheath models", Physica, D97, 498-508, 1996
- [4] S.A. Self and H.N. Ewald, Phys. Fluids, 9, 2488, 1966
- [5] R.N. Franklin, "Plasma Phenomena in Gas Discharges", Clarendon Press Oxford, p.51, 1976