

Analysis of Time-Dependent Behavior of Plasma Sheath using Ion Fluid Model

李 昡 駿[†] · 李 海 準^{*}
(Ho-Jun Lee · Hae June Lee)

Abstract - Dynamics of plasma sheath was analyzed using simple ion fluid model with poisson equation. Incident ion current, energy, potential distribution and space charge density profile were calculated as a function of time. The effects of initial floating sheath on the evolution of biased sheath were compared with ideal matrix sheath. The effects of finite rising time of pulse bias voltage on the ion current and energy was studied. The influence of surface charging on the evolution of sheath was also investigated

Key Words : Sheath Dynamics, Ion current, Ion Energy, Surface Charging

1. 서 론

플라즈마를 이용한 다양한 물질가공 공정에 있어서 sheath의 형성특성과 입사이온의 거동은 중요한 요소이다. 특히 바이어스 전압이 인가된 후, 정상상태에 이르는 시간동안 sheath의 형성과 그에 따른 이온 전류 및 에너지 분포 변화특성은 펄스 바이어스를 사용하는 플라즈마 이온주입(plasma immersed ion implantation), 표면개질, 하드 코팅 등의 공정 특성에 큰 영향을 미친다.

전극에 음의 바이어스가 인가되면 가벼운 전자들이 전극으로부터 매우 빠른 시간동안 밀려 나면서 짧은 기간 동안 이온의 밀도가 공간적으로 거의 균일한 matrix sheath가 형성된다. 이때, 공간상에 존재하는 이온은 sheath에서 생성된 전계에 의해 가속된다. 정상상태에서는 sheath에서의 이온전류 연속에 의해 이온속도가 높은 영역에서 밀도가 감소하면서 잘 알려진 Child-Langmuir sheath를 형성하게 된다. Matrix sheath에서부터 Child-Langmuir sheath에 이르는 과정에서의 sheath 특성에 관해서는 실험적 및 이론적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 1990년도 전후로 Plasma Ion Implantation의 개발과 함께 고압 펄스에 의한 sheath의 시변특성연구가 활발해졌다. M.A Lieberman 등은 sheath 경계의 확장에 의해 단위시간당 유입되는 이온전류가 Child-Langmuir의 공간전하 제한전류(space charge limited current)를 매순간 만족한다는 아래의 식과 같은 가정 하에 전극으로 유입되는 전류의 시 변화를 해석적으로 구하였다(quasi-static child langmuir sheath model).[1].

$$en_0 \left(\frac{ds}{dt} + u_B \right) = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{V_0^{3/2}}{s^2}$$

여기서 n_0, s, u_B, V_0 는 각각 sheath edge에서의 플라즈마 밀도, sheath 경계의 위치, Bohm velocity ($= \sqrt{\frac{kT_e}{M}}$) 및 인가전압을 나타낸다.

M. Shamim 등은 동일한 모델을 원통형 및 구형 전극으로 확장하여 그 효과를 제시하였다.[2][3] Lieberman 등의 연구는 matrix sheath에서 Child-Langmuir sheath에 이르는 시 변화를 잘 설명할 수 있고 인가전압의 유한한 상승시간에 대한 효과뿐 아니라 이온유체모델을 통한 시뮬레이션 결과를 잘 제시하고 있다.[4] M. Shamin 등의 연구는 원통 및 구형 전극의 효과를 제시하였지만 quasi-static Child-Langmuir영역에 국한된 결과를 보여 주고 있다. 뿐만 아니라 대부분의 연구가 도체 전극에 대한 해석만을 보여 주고 있어, 얇은 절연체표면에 펄스 바이어스가 인가되는 경우의 sheath 거동에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 이러한 기존의 연구를 바탕으로, 이온유체 모델과 Poisson 방정식을 이용하여 평면 전극형상에 대한 collisionless sheath에서의 전류밀도, 이온에너지, sheath 경계위치 등의 시변특성을 계산하였다. 특히 인가전압의 상승시간에 대한 영향을 조건별로 연구하였고, 절연체표면을 가공할 때 시료표면의 전하 충전 효과를 포함한 sheath 특성을 계산하여 실제 도체와 절연체전극의 sheath에서 가속된 이온 플럭스를 이용한 여러 플라즈마 설비에 참고가 될 수 있도록 하였다.

2. 모델링 방법

Sheath내에서 이온의 충돌을 무시하고 전자에 의한 이온화 및 2차전자의 효과가 중요하지 않은 조건을 가정하면, 이온의 밀도와 속도는 각각 다음의 입자 및 모델법 보존식을 통해 구해진다.

[†] 교신저자, 正會員 : 부산대학교 전자전기통신공학부 교수
E-mail : hedo@pusan.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 부산대학교 전자전기통신공학부 교수
接受日字 : 2007年 8月 8日
最終完了 : 2007年 10月 12日

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i u_i) = 0$$

$$M_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + M_i (u_i \cdot \nabla) u_i = -q \nabla \Phi$$

전위 Φ 는 poisson 방정식

$$-\nabla^2 \Phi = \frac{q(n_i - n_e)}{\epsilon_0}$$

을 통해 계산되며, 위의 방정식들은 평면 전극형상에 대해서 1차원 미분 방정식으로 표현된다. 충돌이 무시될 수 있는 조건은 이온의 평균자유거리 (mean free path)가 sheath의 두께 보다 큰 경우이며 아르곤의 경우 이온에너지가 100 eV 이상에서 탄성충돌과 전하교환 충돌을 포함한 충돌단면적이 약 $4 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 이므로, 예를 들어 10 mTorr 에서의 평균자유거리는 수 밀리미터 수준이 된다. 따라서 이 영역보다 낮은 압력에서는 이온의 충돌을 무시할 수 있는 저압조건을 충분히 만족한다고 할 수 있다.

전자의 밀도는 압력구배에 의한 힘과 전기장에 의한 힘의 평형조건으로 부터 다음과 같은 Boltzman 분포로서 주어지도록 하였다.

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{\Phi}{T_e}\right)$$

필스바이어스가 인가되기 전의 초기 상태는 전극이 plasma potential로 유지되어 플라즈마와 전극사이에 전위차가 없는 경우와 0 전위로 유지되어 플라즈마와 전극사이에 floating 전위 V_f

$$V_f = -T_e \ln\left(\frac{M_i}{2\pi m_e}\right)^{1/2}$$

에 의한 DC sheath가 형성되어 있는 경우로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 도체전극의 경우, 초기에 sheath 전압이 형성되지 않은 경우와 DC sheath가 형성되어 있는 경우를 나누어 고찰 하였다. 초기 DC sheath를 고려하는 경우는 균일한 이온 밀도를 가진 플라즈마 영역에 V_f 전위와 동일한 바이어스 전압을 인가한 후 sheath의 특성이 충분히 포화되는 시점인 $f_{pi}t \approx 4$ 에서의 값을 초기값으로 취하였다. 전극의 표면이 절연체인 경우는 바이어스가 인가되지 않는 경우 항상 DC sheath를 가지게 된다.

본 논문에서 사용된 모델은 sheath 형성전에 균일한 전자밀도를 가지는 중성플라즈마를 가정하고 전자온도와 밀도를 입력변수로 주기 때문에 바이어스 전극과 플라즈마 소스를 분리하여 구동할 수 있는 유도결합플라즈마 장치 등에서의 sheath특성 해석에 적합하다고 할 수 있다. 반도체 식각 공정이나 표면처리 또는 이온주입공정에서 사용되는 플라즈마 소스의 경우 통상적으로 전자밀도는 일반적으로 입력전력에 비례하는 양으로서 $10^9 \sim 10^{10} / \text{cm}^3$ 정도의 영역에서

주로 사용되고 있으며 전자온도는 공정압력이 감소함에 따라 증가하는 양으로서 통상 수 eV 정도가 된다. 본 논문에서는 이 영역의 플라즈마에 대한 sheath 생성특성을 살펴본다.

모든 계산은 FEM 계산 package인 COMSOL Multiphysics tool을 사용하여 이루어 졌다.[5] [6]

3. 평면 sheath의 기본시변특성 분석

3-1. 초기 DC sheath가 존재하지 않는 경우 동적특성 변화

그림 1은 Ion Plasma frequency $f_{ci} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_0 q^2}{\epsilon_0 M}}$ 가 2MHz에 해당하는 플라즈마 밀도 ($n_0 = 3.54 \times 10^9 / \text{cm}^3$)와 전자온도 3 eV를 가지는 경우, 전극에 바이어스 전압이 인가된 이후, 시간이 경과함에 따른 sheath영역의 공간전하 분포의 변화 양상과 sheath edge의 위치를 보여준다. 바이어스 전압은 0 V에서 시작하여 유한한 상승시간 τ_r 동안 선형적으로 증가하여 전자온도의 100배인 -300 V 를 유지한다. 그림 1의 결과는 τ_r 이 10 nsec, 즉 $\tau_i = 1/f_{ci} = 0.5 \mu\text{sec}$ 의 1/50에 해당하는 값으로 주었다. 계산조건에서의 바이어스 전압 0 V는 실제 전압 V_f (전자온도 3 eV에서 14 V)에 해당하는 값이 된다.

계산결과로부터 초기의 matrix sheath 형성에서부터 Child-Langmuir sheath로의 변화 양상을 잘 확인할 수 있다. Matrix sheath model에 의한 sheath thickness 는

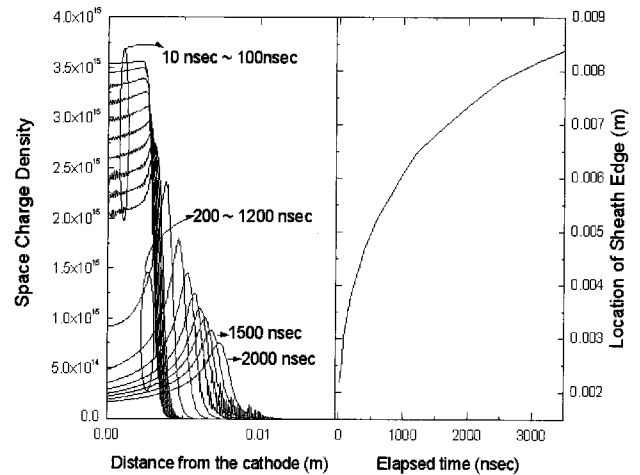


그림 1 Ion Plasma frequency 2 MHz에 해당하는 플라즈마 밀도 ($n_0 = 3.54 \times 10^9 / \text{cm}^3$)와 전자온도 3eV를 가지는 경우, 전극에 -300V 바이어스 전압이 인가된 이후, 시간이 경과함에 따른 matrix sheath영역의 공간전하 분포의 및 sheath edge의 변화 양상

Fig. 1 Temporal evolution of space charge distribution and sheath edge location after application of -300V bias voltage for 2 MHz ion plasma frequency and 3 eV electron temperature

$$s_0 = \lambda_d \left(\frac{2V_0}{T_e} \right)^{1/2}$$

로써 주어지고[7] 계산조건에서의 값은 약 2.16mm 으로서 시뮬레이션 결과와 정성적으로 일치함을 확인할 수 있다.

공간전하 분포의 변화 및 그에 따른 sheath전압 생성의 결과로 나타나는 전극에서의 전류밀도 및 이온에너지의 시변화를 그림 2에 나타 내었다.

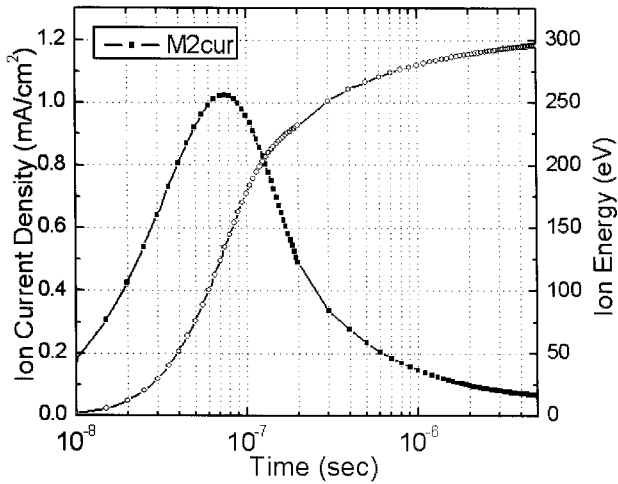


그림 2 그림 2와 동일한 조건에서 전극으로 입사하는 이온 전류밀도와 에너지의 시변화 계산결과
 Fig. 2 Incident ion current and energy as a function of time for the same calculation conditions explained in figure 1.

초기 matrix sheath내에 존재하는 이온이 sheath 전계에 의해 가속되어 전극으로 유입됨에 따른 급격한 전류의 증가를 볼 수 있다. 그 이후 sheath 내의 이온밀도가 감소하면서 전류감소를 동반하게 된다. matrix sheath 내의 이온들이 완전히 유입된 후에는 sheath의 확장에 따라 새로이 sheath 영역으로 진입하는 이온에 의해 전류밀도가 결정된다. 이온 전류가 최대가 되는 시간은 75 nsec 으로서 이 값은 $\frac{1}{2\pi f_{ci}}$ 에 근사적으로 일치함을 알 수 있다. 이 때 입사 이온 에너지는 인가된 bias전압의 약 1/2에 해당함을 볼 수 있다.

충분한 시간이후에는 sheath 영역이 정상상태에 도달하므로, 전극에서의 전류밀도는 free sheath에서 가속된 이온에 의해 형성되는 Bohm current에 근사적으로 수렴하게 된다.

3-2. 인가 바이어스의 상승시간에 따른 이온 입사 전류 및 에너지 분포

인가 전압의 상승시간이 매우 빠른 경우, 앞에서 살펴본 바와 같이 $\tau \approx \frac{1}{2\pi f_{pi}}$ 근처에서 이온전류의 최대값에 도달하지만 실제 바이어스가 인가되는 상황에서는 외부회로의

스위칭 속도 및 sheath capacitance 에 의해 전압이 유한한 상승시간을 가지게 된다. 인가전압의 상승시간에 따른 sheath의 동적특성을 알아보기 위해 초기 floating potential로 유지되고 있는 전극에 선형적으로 증가하는 전압을 인가하여 그 변화를 조사하였다.

그림 3은 상승시간 τ_r 에 따른 이온전류 및 이온에너지 변화 양상을 보여주고 있다. τ_r 이 $\frac{1}{2\pi f_{pi}}$ 보다 충분히 작은 영역인 5 nsec 및 10 nsec영역에서는 전류밀도의 최고값이 거의 변화가 없으나 τ_r 이 증가함에 따라 전류의 최대값이 크게 감소한다.

플라즈마에 투입되는 전력이 증가하면 밀도증가에 의해 sheath 두께가 감소하고 그 결과 회로의 RC 시정수가 증가하기 때문에 투입전력의 증가로서 이온전류의 피크값을 증가시키는 데에는 한계가 있다. 이러한 현상은 뒤에서 살펴볼 절연체 전극에 펄스 바이어스를 인가할 때 더욱 중요하게 된다.

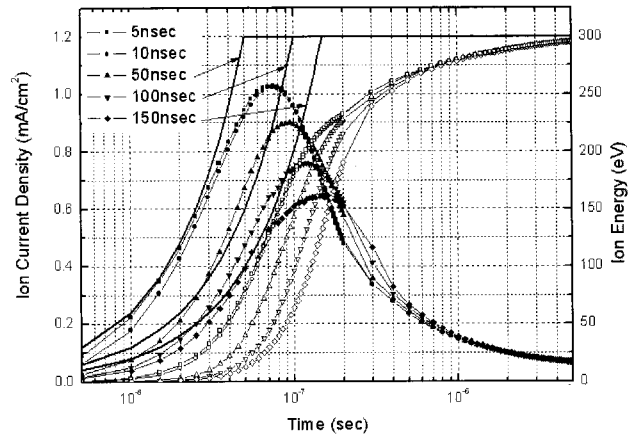


그림 3 인가 바이어스 전압의 상승시간에 따른 이온 입사 전류 및 에너지의 시 변화
 Fig. 3 Temporal variation of incident ion current and energy as a parameter of rising time of bias voltage

3-3 초기 floating sheath가 존재하는 경우 인가 바이어스전압의 상승시간에 따른 이온 입사전류

초기에 DC floating sheath가 존재하지 않는 경우는, 전극에 V_f 에 해당하는 플러스 전압을 인가하여 다량의 전자전류가 흐르는 조건에 해당한다. 그러나 이러한 조건은 실제 플라즈마응용에서는 사용되기 어렵다. 대부분의 응용에서는 펄스 바이어스가 인가되기 전에 floating sheath가 형성되어 있기 때문에 바이어스인가 시 matrix sheath의 형성이 상당히 제한적이라고 할 수 있다. 그림 4는 초기 floating sheath가 형성되어 있는 상황에서, 인가된 바이어스 전압의 rising time에 따른 이온전류의 시 변화를 보여준다. 그림 3의 결과에 비해 전류의 최고점 값이 낮음을 알 수 있고, 인가전압이 5 nsec 의 빠른 상승시간을 가지더라도 전류가 최고점에 도달하는 시간이 상당히 지연됨을 확인할 수 있다. 이것은 그

림 5에서 보는 바와 같이 초기에 형성되어 있는 공간전하 영역에서의 이온밀도가 matrix sheath형성 초기의 이온밀도보다 매우 낮아, 바이어스가 인가된 직후의 sheath 길이가 길어짐에 따른 현상이다. 전류가 최고점에 도달하는 시점이 지연됨과 동시에 공간전하밀도가 최고점을 나타내는 영역이 확장되고, 전압강하영역이 시간이 지남에 따라 증가하는 특성이 그림 5에 나타나 있다. 참고적으로 sheath로 입사되는 이온의 속도가 $\sqrt{\frac{kT_e}{M}}$ 이상 되어야 한다는 Bohm의 sheath 조건에서 예측되는 sheath - pre sheath 경계에서의 전위 (본 계산조건에서는 $V_{bohm} = \frac{T_e}{2} = 1.5eV$) 를 그림 5에 표시하였다.

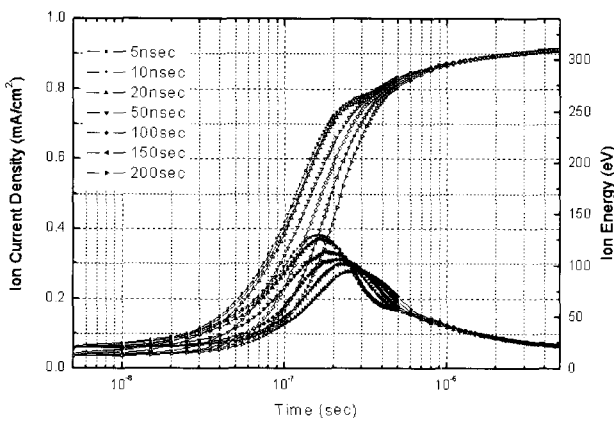


그림 4 초기 floating sheath를 고려한 바이어스 전압의 상승 시간에 따른 입사 이온전류 및 에너지 시변화 양상
 Fig. 4 Temporal variation of incident ion current and energy as a parameter of rising time of bias voltage including the effect of initial floating sheath formation

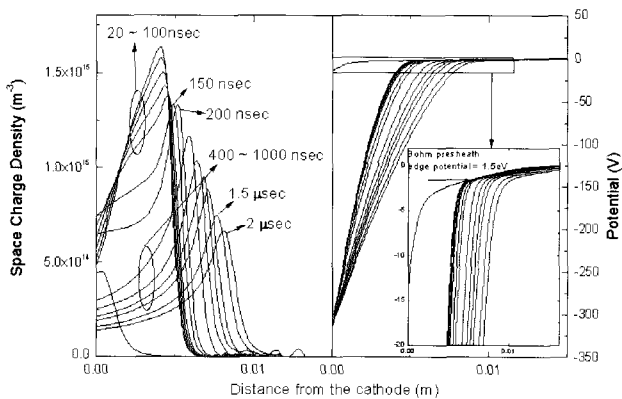


그림 5 초기 floating sheath 형성을 고려한 경우 공간전하 및 전위분포의 시변화 (바이어스 전압의 상승시간 = 5 nsec)
 Fig. 5 Temporal variation of space charge and potential distribution including the effects of initial floating sheath formation (Rising time of bias voltage = 5 nsec)

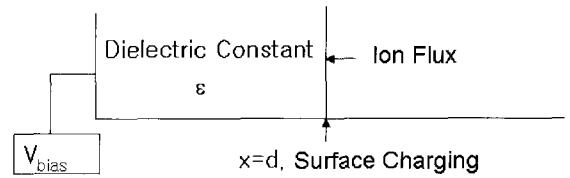


그림 6 절연체 표면을 가진 전극에서 계산영역의 개략도
 Fig. 6 Schematic diagram of calculation domain for the electrode with insulating surface

4. 절연체 표면의 charging 효과가 존재하는 경우의 sheath 형성특성

플라즈마를 이용한 표면처리 프로세스에서 있어서 산화막, 질화막 또는 폴리머와 같은 절연체의 표면특성의 개질은 매우 중요한 부분을 차지한다. 이온에 의한 절연체 표면 특성 개질을 위해서는 통상적으로 이온 플라즈마 주파수 보다 훨씬 높은 주파수를 가지는 교류 전압을 용량결합시켜 self-bias에 위한 sheath 전계를 이용하는 경우가 일반적이다. 그러나 낮은 주파수의 펄스 전원을 사용하는 경우, 일반적으로 RF 전원과 달리 임피던스 정합회로가 필요치 않고 비교적 경제적으로 바이어스 전원을 구성할 수 있다. 이러한 경우, 절연체 표면의 charging 효과가 존재하는 경우에 있어서 sheath 형성특성의 이해가 매우 중요하다. Charging 효과를 고려하기 위해 그림과 같이 두께 d, 유전상수 ε을 가지는 유전체 영역을 추가하고 sheath와 유전체 경계의 표면전하 밀도는 아래와 같은 상미분 방정식을 통해 구하였다.

$$\frac{d\rho_s}{dt} = qn_i u_i$$

이 표면전하 밀도는 Poisson 방정식의 내부 경계조건이 된다.

$$\epsilon E_{dielectric} - \epsilon_0 E_{sheath} = \rho_s$$

외부 바이어스가 인가 되기전의 초기 sheath 상태는 금속 전극의 경우와 동일하게 유전체 표면에 $-V_f$ 에 해당하는 값을 강제적으로 인가한 후 형성된 floating sheath를 기준으로 하였다.

그림 7은 이온플라즈마 주파수가 2MHz, 전자온도 3eV 조건을 가지는 플라즈마에 대하여 유전체의 두께와 비유전상수가 각각 1 cm, 10 의 경우, 300 V 바이어스가 인가되었을 때 sheath에서의 공간전하 밀도 분포와 절연체를 포함한 sheath에서의 전위분포의 시 변화 특성을 보여준다. 바이어스 인가 초기에는 절연체 표면에 이온이 축적되기 전 이므로 공간전하 및 전위분포의 변화 양상이 금속전극의 그것들과 유사하다. 다만, 외부 인가전압이 matrix sheath부분과 절연체에 각각 나뉘어 분포되기 때문에 형성된 sheath에 작용하는 실제 전압은 근사적으로 다음과 같다.

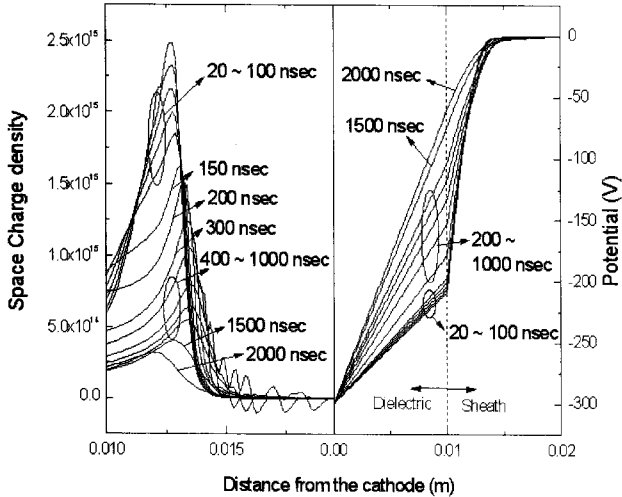


그림 7 공간전하 밀도 분포와, 절연체를 포함한 sheath에서의 전위분포의 시변화 특성 (이온플라즈마 주파수 2 MHz, 전자온도 3eV, 유전체의 두께 1cm, 비유전상수 10, 바이어스전압 -300 V)

Fig. 7 Space charge distribution and potential distribution in the sheath and insulating electrode (Ion plasma frequency 2 MHz, electron temperature 3 eV, thickness of dielectric 1 cm, relative permittivity 10, bias voltage -300 V)

$$V_{sheath} = \frac{C_{dielectric}}{C_{dielectric} + C_{sheath}} V_{appl} \approx \frac{\epsilon d_s}{\epsilon d_s + d_{diel}} V_{appl}$$

여기서 d_s 는 sheath를 평판 용량부하로 근사할 때의 환산두께 (effective sheath thickness) 이다. 초기 공간전하 분포에서 최대의 공간전하밀도를 보여주는 위치를 sheath 경계로 근사하여 $d_{sheath} \approx 2.8mm$ 값을 대입하여 계산해보면 sheath에 인가되는 전위차는 약 220 V 로서, 전위분포계산 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 결국 처리 대상물의 정전용량 값이 sheath 용량에 비해 작아질수록 인가할 수 있는 이온에너지가 제한되기 때문에 높은 이온에너지를 필요로 하는 프로세스에서는 금속전극에 비해 더 큰 전압을 인가하거나 전자의 밀도를 낮추고 온도를 올려 sheath의 정전용량을 줄여야 하고 절연체 표면에 충분한 이온량을 인가하기 위해서는 펄스 주파수의 증가가 요구됨을 알 수 있다. 입사 이온에 의한 표면전하의 축적으로 표면전위가 지속적으로 상승하면 sheath에 인가되는 전압이 감소하여 도체전극의 경우와는 다르게 입사 이온에너지가 크게 줄어들고 sheath 두께도 감소하여 정상상태에서는 floating sheath로 수렴한다.

그림 8에 유전체 전극으로 입사되는 이온전류, 에너지 및 표면전하의 시변화 특성을 종합적으로 정리하여 표시하였다. 이온전류의 변화특성은 금속전극과 유사함을 알 수 있는데 이것은 초기에 생성된 matrix sheath로부터 이온이 입사되는 구간에서는 표면전하의 축적량이 많지 않고 전위분포가 공간전하에 의해 지배되기 때문이다.

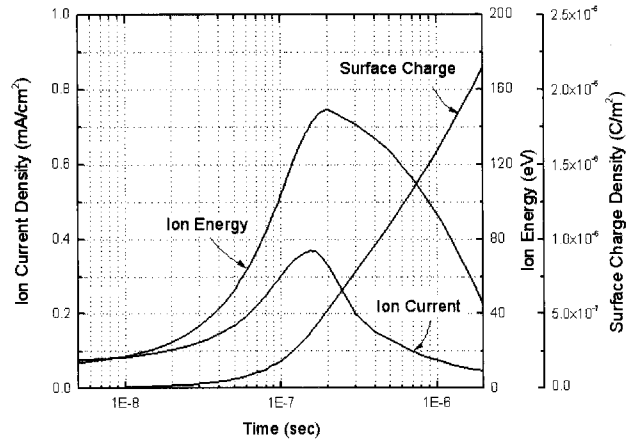


그림 8 전극으로 입사되는 이온전류, 에너지 및 표면전하 축적량의 시변화 양상 (계산조건은 그림 7의 경우와 동일)

Fig. 8 Ion current, energy and surface charge density as a function of time (All calculation parameters are the same as those of fig. 7)

4. 결 론

본 논문에서는 간단한 유체 방정식을 이용하여 펄스 바이어스가 인가된 이후 sheath의 발달과정과 그에 따른 전류밀도, 이온에너지변화의 동적 특성을 조사하였다. 특히 인가 펄스전압의 유한한 상승시간에 대한 효과와 전극 표면이 절연물인 경우에 대한 sheath의 시변화 양상을 비교 연구하였다. 충분한 최고점 전류를 얻기 위해서는 펄스 상승시간이 $\frac{1}{2\pi f_{pi}}$ 으로 주어지는 특성 시간 이하로 되어야 함을 확인하였다. 바이어스 인가 전, 초기에 존재하는 floating sheath는 이상적인 matrix sheath에 비해 peak 전류를 크게 감소시킬 수 있었다. 전극표면에 절연물이 존재하는 경우는 전하충전에 의한 표면전위 상승으로 도체전극과는 달리 sheath에 걸리는 전압이 지속적으로 감소하고 초기전압인가에서도 전극의 정전용량과 sheath 용량에 따라 전위차가 분할되는 현상을 계산결과로서 보여 주었다. 계산결과로부터, 주어진 펄스 전압에 대하여 높은 에너지를 가진 이온 전류를 공급하기 위해서는 낮은 플라즈마 밀도와 높은 전자온도의 조건이 유리하고, 입사이온량의 증가를 위해서는 펄스 주파수의 증가가 중요함을 예측할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M.A.Lieberman "Model of plasma immersed ion implantation" J.Appl. Phys. 66(7) pp2926-2929 1989
- [2] J.T. Scheuer, M. Shamim, and J.R.Conrad " Model of plasma ion implantation in planar, cylindrical, and spherical geometries ", J.Appl. Phys. 67(3) pp. 1241-1245 1990
- [3] M.Shamim, J.T. Scheuer and John R. Conrad "Measurement of spatial and temporal sheath evolution for spherical and cylindrical geometries in plasma source ion implantation", J.Appl. Phys. 69(5) pp. 2904-2908 1991
- [4] R.A. Stewart and M.A. Lieberman " Model of plasma immersion ion implantation for voltage pulses with finite rise and fall times" J.Appl. Phys. 70(7) pp. 3481-3487 1991
- [5] William B J Zimmerman "Multiphysics Modeling with Finite Element Methods" World Scientific, 2006
- [6] Comsol AB. " Comsol Multiphysics User Manual ver 3.0 " 2006
- [7] M.A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", John Wiley and Sons Inc. 2005

저 자 소 개



이 호 준 (李晔駿)

1966년 10월 14일 생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 전기공학과 부교수

Tel : 051-510-2301

Fax : 051-513-0212

E-mail : hedo@pusan.ac.kr



이 해 준 (李海準)

1972년 2월 25일생. 1994년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업. 1996년 포항공대 물리학과 석사 졸업. 1998년 포항공대 물리학과 박사 졸업(이학박사). 현재 부산대학교 전자전기통신공학부 조교수

Tel : 051-510-3516

Fax : 051-513-0212

E-mail : haejune@pusan.ac.kr