

전자빔에 의해 생성된 플라즈마에 관한 시뮬레이션 연구

배호원, 심승보, 황석원, 송인철, 이해준, 이호준, 박정후
 부산대학교 전자전기공학과

Simulation of a Electron Beam-produced Plasma

Hyo-Won Bae, Seung-Bo Shim, Seok-Won Hwang, In-Cheol Song, Hae June Lee, Ho-Jun Lee, Chung-Hoo Park
 Department of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract - 본 연구에서는 전자빔에 의해 생성되는 저온 플라즈마의 특성을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 전자빔 소스에서 전자를 생성하여 가속 전압을 인가하여 챔버로 보내고, 챔버 속의 Argon 중성 기체와 전자가 충돌하여 2차 방전을 일으킴으로써 저온 플라즈마가 생성된다. 이 때 중성기체의 압력과 가속전압의 변화에 따라서 플라즈마 밀도와 온도가 변하는데, 어떠한 특성을 가지는지 알아보기 위해 Particle-In-Cell(PIC) 시뮬레이션을 이용하였다. 챔버 내부에서 전자빔과 중성기체에 의한 변화를 관측했고, 이 때 전자빔 소스에서 Negative Acceleration Voltage는 10V~40V, 챔버 내부의 Argon 중성 기체의 압력은 1mTorr~20mTorr 조건하에서 시뮬레이션을 수행하였다. Electron Energy Distribution function (EEDF)을 관찰한 결과, 가속전압이 높을수록 낮은 에너지를 가지는 전자의 수가 증가하여 전자 밀도는 증가하며, 가스 압력이 높을수록 EEDF의 기울기가 커지면서 전자온도는 감소함을 알 수 있었다.

산란, 여기화, 이온화가 일어나고 이온과 중성자간의 충돌에서는 산란, 전하 교환이 발생한다. 본 연구에서는 전자와 중성자 간의 충돌에서 Ar의 cross section 데이터들이 사용되었다. 이들의 입자들을 실제 Field로 결합시키기 위하여 시뮬레이션에서는 격자에 weighting 시킴으로써, 위치, 속도로부터 전하밀도, 전류밀도를 얻는다. 이렇게 얻은 두 밀도 값을 다음의 Poisson equation을 이용하여 적분해서 다시 전계, 자계의 세기를 얻게 된다.

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

이들을 다시 격자에 Weighting 시킴으로써 입자의 힘을 얻게되고, 다시 앞의 과정을 반복하면서 시뮬레이션을 하게 된다.

1. 서 론

플라즈마는 반도체와 디스플레이의 에칭, 식각 등의 박막공정에 널리 응용된다.[1-2] 최근에는 반도체의 밀도를 향상시키기 위해 반도체 장치들의 크기가 감소해왔다. 여기에 맞춰서 훌륭한 균일성, 고효율, 그리고 플라즈마변수들을 보다 정밀하게 제어하기 위해 다양한 플라즈마 원들이 개발되어왔다.[3] Electron Cyclotron Resonance(ECR)[4], Inductively Coupled Plasma(ICP)[5], Helicon-wave excited plasma[6] 등과 같은 기존의 플라즈마 소스는 챔버 내의 자유전자를 전기장을 이용해 가열하여 기체화를 유도하여 높은 온도를 가지는 반면, 전자빔을 이용한 플라즈마는 전자빔과 챔버 내부에 있는 중성 기체와의 충돌을 유도하므로 낮은 플라즈마 온도 특성을 가진다. 이러한 저온의 플라즈마는 Atomic Layer Deposition(ALD)[7]와 같은 낮은 온도에서의 공정을 필요로 하는 분야에서 적용되고 있다. 전자빔 플라즈마는 또한 다양한 압력조건과 가속전압을 이용한 전자빔의 세기의 조절도 용이하므로 플라즈마 밀도의 균일성 및 제어측면에서 훌륭한 특성을 가지고 있다.[8]

본 논문에서는 전자빔이 중성 Argon 기체에 충돌하여 발생하는 플라즈마의 특성들을 분석하기 위해, Particle In Cell(PIC)[9] 시뮬레이션을 이용하였다. PIC 시뮬레이션은 다양한 플라즈마 시뮬레이션에 있어서 가장 정확한 방법 중의 하나이다. PIC 코드는 분포함수가 미리 정의되어 있는 유체코드에 비해 더욱 정확하다. PIC코드는 각각의 입자의 움직임을 고려하기 때문에 정확성이 높지만 계산이 많아져서, 정상 상태에 도달하기까지의 시간이 많이 소요되기 때문에, 3차원상의 챔버의 세로축 중심을 1차원의 축으로 근사화 시켜서 1차원 PIC 코드인 XPDP1[10]을 이용하여 시뮬레이션을 하였다.

2. 본 론

2.1 물리적 모델과 기초 방정식

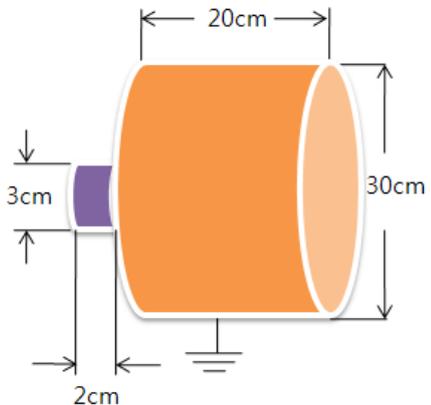
본 논문에서 사용된 PIC 시뮬레이션에서는 먼저 입자(Particle)의 움직임을 고려해줘야 한다. 이를 계산하기 위해 다음의 Newton-Lorentz equation이 사용된다.

$$m \frac{dv}{dt} = \mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

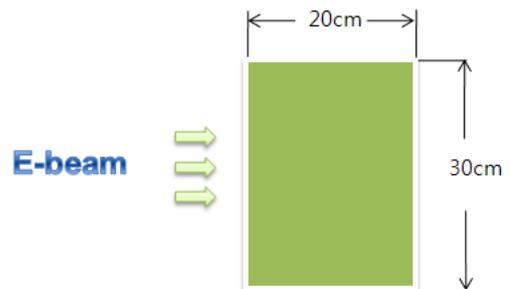
이 때 F는 입자의 힘, m은 입자의 질량 v는 입자의 속도, q는 입자의 전하량, E와 B는 전계와 자계의 세기이다. 이로부터 입자의 속도와 위치 정보를 얻는다. 그 후, 경계에서 입자가 발생하는 것과 사라지는 것을 계산한 후에 Monte Carlo Collision(MCC) 기법으로 전자와 Ar 중성 기체의 충돌 반응을 계산한다. 이 때 전자와 중성자 간의 충돌에서 탄성

2.2 시뮬레이션 모델

본 시뮬레이션에서는, 전자빔은 전자빔 발생 장치에 의해 생성되었고 보고, 그 장치에서 가속전압을 가하여 전자빔이 접지된 Ar 중성기체가 있는 챔버 속으로 들어가도록 시뮬레이션 하였다. 사용된 코드는 위치는 1차원, 속도는 3차원을 가지는(1d3v) XPDP1 코드이다.



<그림 1> 전자빔 플라즈마 발생을 위한 챔버



<그림 2> 시뮬레이션에서 사용된 모델

그림 1에서 좌측의 작은 챔버에서는 전자빔의 에너지 조절을 위하여, 가속전압을 걸어주는데 시뮬레이션에서는 전자빔 소스 내부를 시뮬레이션 도메인에 포함시키지 않은 대신에, 가속전압과 한 전자의 전하량의 곱인 전자빔의 에너지를 이용하여, 우측 챔버로 들어가는 전자빔의 초기속도를 조절하였다.

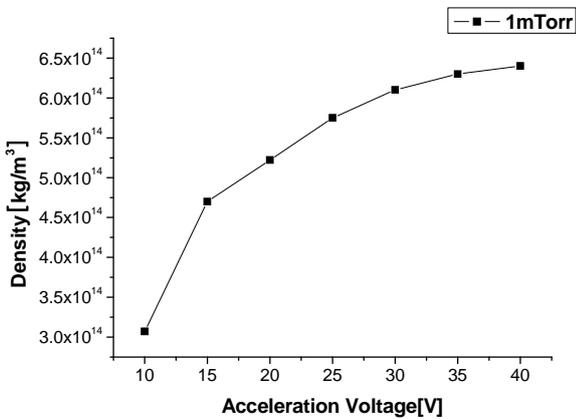
$$\frac{1}{2}m_e v_{x0}^2 = E_{e-beam} \quad (3)$$

$$v_{x0} = \sqrt{\frac{2 \times E_{e-beam}}{m_e}} \quad (4)$$

이 때 m_e 는 전자의 질량, v_{x0} 는 우측 챔버로 들어가는 전자빔의 초기속도, E_{e-beam} 은 전자빔의 에너지이다.

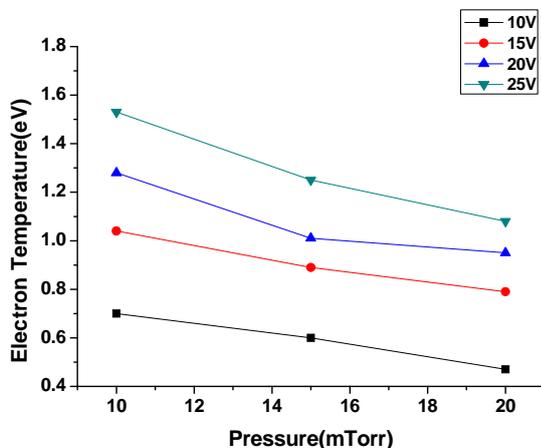
2.3 시뮬레이션 결과

먼저, 가속전압에 따른 플라즈마의 밀도를 살펴보기 위해, 중성기체의 압력 1mTorr 에서 가속전압을 10V부터 40V까지 변화시켰다.



<그림 3> 가속전압에 대한 플라즈마밀도

그림 3에서 알 수 있듯이, 가속전압이 증가할수록, 플라즈마의 밀도가 증가한다. 이는 전자빔의 에너지는 가속전압에 비례하고, 전자빔의 에너지가 낮은 영역에서의 이온화 단면적이 전자빔의 에너지에 따라 증가하기 때문이다. 이를 통해 가속전압의 변화를 통하여 매우 효율적으로 플라즈마의 밀도를 제어할 수 있다.



<그림 4> 압력, 가속전압에 대한 전자온도

다음으로 전자온도의 특성을 살펴보기 위해 압력을 10mTorr, 15mTorr, 20mTorr 3가지로 변화시키고, 여기에 각각 가속전압은 10V, 15V, 20V, 25V 의 4가지로 변수를 두어서 총 12가지의 경우를 고려했다. 전자빔이 들어가는 입사부에서 5cm 떨어진 지점부터 10m지점까지의 EEDF 를 Log scale로 관찰했다. 이 때 플라즈마의 생성에 직접적으로 관여하는 Low energy 영역의 부분의 기울기의 역수가 플라즈마의 온도에 해당된다. 그림 4에서 보면, 중성기체의 압력이 증가할수록 전자온도는 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이는 압력이 증가하면서 중성기체의 입자수가 증가하고, 이는 전자빔이 가지고 있던 에너지가 그만큼 더 많은 입자들로 분산되는 현상이다. 하지만, 전자온도는 가속전압에 더 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 가속전압이 커질수록 전자온도는 올라갔는데, 이는 가속전압이 증가할수록 flux도 증가하기 때문이다. 전반적인 전자온도가 2eV 이하의 값을 가지는데, ICP, ECR, Helicon 등의 플라즈마 소스에 비해서 현저히 낮은 온도를 가지는 것을 알 수 있고, 이는 식각 공정에서의 notching 현상 등을 크게 줄일 수 있으므로 플라즈마의 박막 공정에 응용될 수 있다.

3. 결 론

입자 개개의 움직임을 고려하는 PIC 시뮬레이션을 이용하여 전자빔에 의해 생성되는 플라즈마를 전자빔의 가속전압(10V~40V)과 중성기체의 압력(1mTorr~20mTorr)을 변화 시켜가면서 플라즈마의 밀도와 전자 온도에 대하여 연구하였다. 가속전압이 변하면 전자빔의 에너지 및 flux, 이온화 단면적이 달라진다. 가속전압이 높을수록 플라즈마의 밀도가 높아지고, 중성기체의 압력이 높아지고, 가속전압이 낮아질수록 전자온도가 낮아졌다. 전자빔에 생성된 플라즈마의 전반적인 온도를 2eV 이하로 나타냈고, 이는 박막 공정에 있어서 높은 균일성과 안정적인 제어를 보장해줄 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. Chapman, Glow Discharge Process, (Wiley, New York, 1980).
- [2] M.A. Liberman and A.J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing (Wiley, New York, 2005)
- [3] K.H. Bai, J.I. Hong, C.W. Chung, S.S. Kim, H.Y. Chang, Phys. Plasmas 8 (2001) 7.
- [4] J. Asmussen, J. Vac. Sci. Technol. A 7, 883 (1989).
- [5] J. Hopwood, Plasma Sources Sci. Technol. 1, 109 (1992).
- [6] F. F. Chen and R. W. Boswell, IEEE Trans. Plasma Sci. 25, 1229(1997).
- [7] M. Leskela and M. Ritala, J. Phys. IV 9-Pr8, 837 (1999).
- [8] R. A. Meger, D. D. Blackwell, R. F. Fernsler, M. Lampe, D. Leonhardt, W. M. Manheimer, D. P. Murphy and S. G. Walton, Phys. Plasmas 8, 2558 (2001).
- [9] C. H. Shon, H. J. Lee, and J. K. Lee, Comp. Phys. Commun. 141, 322 (2001).
- [10] Verboncoeur, J.P., M.V. Alves, V. Vahedi, and C.K. Birdsall, J. Comp. Phys, 104, 321, 1993.