Neutral Loop Discharge 플라즈마의 전자거동과 최적조건에 관한 기초적 연구

論 文
50C-6-5

A Fundamental Study on the Electron Behavior and Optimum Condition for the Formation of a Neutral Loop Discharge Plasma

成 烈 汶* · 金 鍾 經** · 朴 正 后***
(Youl-Moon Sung · Jong-Kyung Kim · Chung-Hoo Park)

Abstract - In order to obtain guidelines for design and operation of a new plasma source by a magnetic neutral loop discharge(NLD), the electron behavior was studied experimentally and numerically. Experimentally, the magnetic field gradient was changed over a wide range, and it was found that there existed an optimum value for efficient plasma production. Analyses of the electron behavior were performed using a model that included effects of a three dimensional electromagnetic field configuration considering the spatial decay of the electric field, and the limitation to the motion of electron caused by the existence of walls and thus electron loss at wall surfaces. These three dimensional factors were found to explain the existence of the optimum magnetic field gradient. It was shown that the L dependence of the plasma production efficiency was firstly decided by the finite decay length of the electric field strength, which was further modified by electron elastic collisions with neutral atoms which drove the electron to walls. The latter effect tends to reduce the optimum value of L.

Key Words : Neutral Loop Discharge (NLD) Plasma, Processing plasma, Electron behavior, Meandering motion, Electron heating

1. 서 론

최근의 반도체 제조공정에 있어서는, 웨이퍼의 대구경화(>30[cm])가 급속히 진전되고 있고, 0.1[μm] 레벨의 초미세 가공기술이 요구되고 있다. 이러한 목적에 부응한 새로운 프로세스용 플라즈마원으로서 Neutral Loop Discharge (NLD)플라즈마가 제안되고 있다[1]. NLD 플라즈마는 우선 진공챔버 주변에 배치한 3개의 전자코일에 의해 챔버내부에 자장강도 zero의 자기중선선(NL)을 형성한다. 이 NL에 고주파 전장을 인가하면, NL부근에서의 전자거동이 비선형적으로 되어 전자가 효율적으로 가열되면서 낮은 압력 하에서도 고밀도의 플라즈마가 형성된다. NLD 플라즈마에서는 전자코일의 전류치나 그 배치에 의해 기판에 대한 NL의 형성위치나 형상을 임의로 변화시킬 수 있기 때문에, 플라즈마의 대구경화나 NL의 동적 제어를 통한 대면적의 균일한 프로세스가 가능해질 것으로 기대되고 있다[2,4].

NLD 플라즈마 생성의 이론적 해석으로서는, Yoshida씨의 slab형 자장의 계산모델에 의해 NLD 플라즈마에서의 특이한 전자거동과 에너지 흡수기구가 보고되고 있다[5]. 그리고 실험연구로서, 플라즈마 생성부에 해당하는 NL부근의 전자거동을 파악하고자 전자온도, 밀도분포 및 여기·전리과정에 관하여 다양한 조건에서의 고찰결과가 보고되고 있다[2,3,6]. 그 동안의 이론 및 실험결과들을 검토하면, 상기의 slab 모델로서는 NL부근의 전자거동의 개요는 설명할 수 있는 반면, 자장과 플라즈마의 생성효율의 관계에 대해서는 설명되지 않는 문제점이 확인되었으나, 아직까지 이 부분에 대한 명확한 해석은 없다.

금후 NLD 플라즈마를 산업응용에 적용하기 위해서는, 현실적인 전자거동을 기술할 수 있는 모델을 확립해서 방전의 최적화를 통한 장치설계의 지침을 명확히 할 필요가 있다. 본 연구는 실제 플라즈마 운전조건 하에서의 전자의 거동을 실험 및 이론, 양측면에서 고찰하여 NLD 플라즈마의 최적 생성조건 및 장치설계의 지침을 확고히 하고자 한다. NLD 플라즈마의 최적 생성조건을 규명하기 위해, 그 해석 모델로서 실제 운전조건을 고려해서, 그 효과를 계산과정에 도입한 3차원적 계산모델을 제작하여, NL주변의 전자거동에 대해 해석하였다. 그리고, 이온 전류밀도에 대한 측정실험을 행하여, 계산과 실험결과를 비교해 나가면서 플라즈마 생성효율의 최적화에 대해 검토하였다.

2. 플라즈마의 생성 및 이론

NLD 플라즈마의 생성에는 동작 가스압을 저기압으로 유지하기 위한 진공용기, 자속밀도 zero의 링(ring)상의 NL을 형성하기 위한 자장발생 시스템 및 유도전장 형성을 위한 고주파 전원장치가 필요하다. 자장 및 고주파 전장발생을

* 正 會 員 : 日本 宮崎大 電氣電子工學科 助敎授 · 工博
** 正 會 員 : 釜慶大 工大 電氣電子工學科 敎授 · 工博
*** 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣電子工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2000年 12月 20日
最終完了 : 2001年 4月 27日

위한 코일과 안테나의 배치를 그림 1에 나타내었다. NL을 포함한 자장은 동축상에 배치했던 3개의 코일로서 형성한다. 코일 1과 3에 같은 방향의 전류를 흘려 단순 미러(mirror) 자장을 형성시킨다. 이때는 이들 코일사이의 중간 지점의 평면상에 자속밀도가 zero가 되는 NL가 링상으로 형성된다. 두 코일의 전류크기가 다르면 NL은 상하로 이동한다. 다음에 코일 2의 전류를 코일 1, 3과 역방향으로 흘려주면 NL은 동일한 평면상에 2개로 갈라진다. 역방향 전류의 대소에 따라 NL의 축방향 위치 및 반경을 자유로이 조절할 수 있다. 이렇게 형성된 NL에 고주파(RF) 안테나에 의해 고주파 전장을 인가하면 링상의 NLD플라즈마가 생성된다. 이상과 같이 3개의 코일전류를 제어함으로써 임의의 위치에 임의의 반경의 플라즈마 링을 자유로이 생성시킬 수 있다.

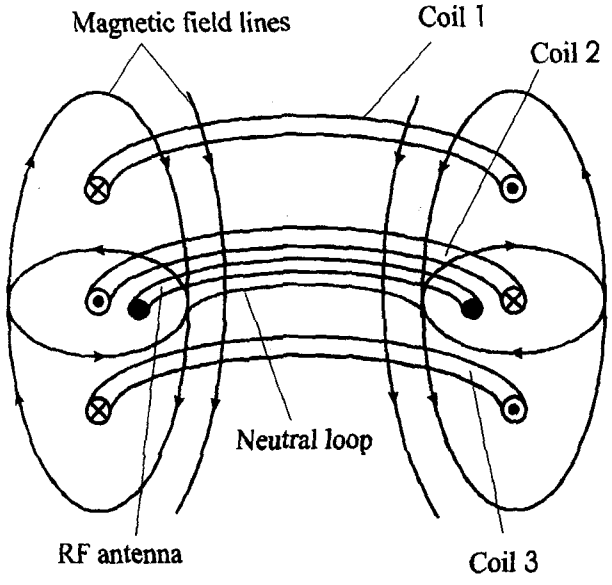


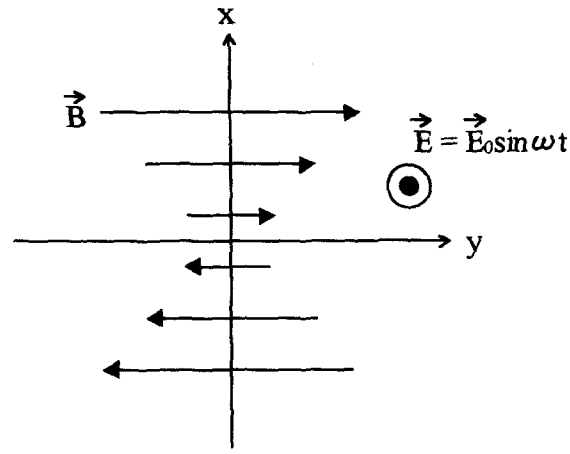
그림 1 NLD 발생을 위한 코일과 RF 안테나의 배치도
Fig. 1 Arrangement of magnetic coil and RF antenna for NLD production

NLD 플라즈마의 무충돌 조건하에서 NL주변의 전자거동은 Yoshida씨에 의해 이론적으로 해석되어 왔다. 이하에서는 그 이론의 개요를 간단히 기술한다[1,5]. 먼저 전장 및 자장의 운동방정식은

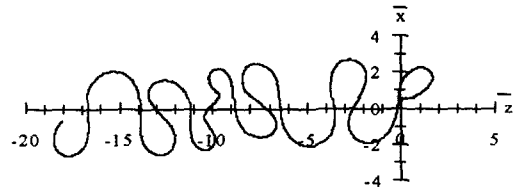
$$m_e \frac{d^2}{dt^2}\mathbf{x} = -e\left[\mathbf{E} + \frac{d}{dt}\mathbf{x} \times \mathbf{B}\right] \qquad (1)$$

로 나타낼 수 있다. NL부근의 자장구조를 가장 간단히 구현하면, 그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 y방향의 자장이 존재해서 x방향으로 자장 **B**의 값이 직선적으로 변화하고 있는 것으로 되고, 그 강도는 y에 비례해서, y=0의 면을 기준으로 자장의 방향이 역전되는 것으로 된다. 동시에 z방향에 각주파수 ω로 시간적으로 변화하는 전장 $\mathbf{E}=\mathbf{E}_0\sin\omega t$를 인가했다고 생각하자. 이 경우 자장 **B**는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\mathbf{B} = \mu_0 J[0, x, 0] \qquad (2)$$



(a) NL부근의 자장 및 전장의 배치 (slab 모델)
(a) Arrangement of electric and magnetic field around NL (slab model)



(b) NL 근방의 전자궤적
(b) electron orbit around NL

그림 2 NL근방의 전장 및 자장의 모델화된 배치도와 전자의 운동궤적
Fig. 2 Arrangement of electric and magnetic field around NL and electron orbit

B는 x=0에서 zero가 되고 또 전자사이클로트론 공명(ECR)을 만족하는 자장강도 $B_0(=m_c\omega_{ce}/e$; ω_{ce}와 m_c는 각각 전자의 사이클로트론 주파수와 질량)의 점을 $x=\pm L$ 로 한다. 위치와 시간을 각각 ω와 L로 규격화해서 다음과 같이 나타낸다.

$$\bar{t} \equiv \omega t \qquad (3)$$

$$\bar{x} \equiv \frac{x}{L} \qquad (4)$$

식 (3), (4)에 의하면 RF 1주기인 경우 $\bar{t} = 1$ 이고,

ECR점에서 변위는 $\bar{x} = 1$ 로 된다. 이때 식 (1)의 x성분 및 z성분은 각각 다음 식과 같이 된다.

$$\bar{x}'' = \bar{x}\bar{z}' \tag{5}$$

$$\bar{z}'' = -\bar{x}\bar{x}' + \bar{F}' \tag{6}$$

여기서 $\bar{F}'$ 는 자장에 전계을 규격화한 환산전장 F 를 시간미분한 것으로서 F 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$F = F_0 \sin\omega t, \quad F_0 = \frac{E_0}{L\omega B_0} \tag{7}$$

식 (6)을 $\bar{t}$ 로 적분하면

$$\bar{z}' = -\frac{\bar{x}^2}{2} + F + C \tag{8}$$

로 된다. 단, C는 적분상수이다. 식(5)에 식(8)을 대입하면 다음과 같이 간단히 규격화된 전자의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\bar{x}'' = -\frac{\bar{x}^3}{2} + (F+C)\bar{x} \tag{9}$$

x=0 주변의 전자의 운동방정식을 해석하여 궤도를 계산하면 F값이 1자리수일 경우, 전자는 -2L 〈x 〈+2L의 범위에서 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 비선형적으로 곡절(曲折)된 운동(meandering motion)을 한다. 이 운동범위는 ECR영역을 포함하기 때문에 전자는 RF전장에 의해 에너지를 효율적으로 흡수할 수 있게 된다.

3. 실험방법 및 결과

NLD 플라즈마의 실험장치의 개요를 그림 3에 나타내었다. 플라즈마 발생용 진공챔버는 스텐레스 재질로 내경 308[mm]이고, 자장발생용 코일은 내경 390[mm]의 코일1(권선수 60, 전류치 I_1), 코일2(권선수 60, 전류치 I_2)와 내경 320[mm]의 코일3(권선수 128, 전류치 I_3)을 챔버 외측에 동축상으로 배치하였다. NL은 직류 정전류원(TAKASAGA Ltd. UX010, 최대10[V], 200[A])에 의해 코일 1, 3에 동일방향, 코일2에 역방향의 전류를 흘려 형성한다. 반경 120mm의 NL을 설정할 경우, 각각의 코일의 전류치는 I_1=66.8[A], I_2=193[A], I_3=115[A]로 된다. 이때의 NL평면상의 중심자장의 강도는 가우스메터(Lake Shore社 460, 3channel, 0.03[mT]~30[T], 오차 0.0007%)로 실측한 결과 약 40 [Gauss]였다. 석영제의 글라스 관으로 둘러싸여진 반경 130[mm]의 1턴 RF 안테나는 NL의 형성위치로부터 방전챔버의 축방향으로 35[mm]떨어진 위치에 배치하였다. RF주파수가 13.56[MHz]의 경우, 전자 사이클로트론 공명의 자장강도 B_0는 4.8 [Gauss]로 된다. 코일의 전류치를 변화시켜서 NL로부터 B_0(4.8 [gauss])로 되는 거리(L)를 2[mm]정도에서 100[mm] 정도까지 변화시켰다. 상기의 전류치의 경우에서는 가우스메타 실측결과, L이 3.4[mm]였다. 또 RF 파워가 400[W]일 때, NL상에 유도된 전장강도의 피-크치는 직접 설계·제작한 자기 프로브에 의해 유도자장을 실측하여, 그 측정값으로부터 유도전장을 환산한 결과 204[V/m]임을 알 수 있었다.

플라즈마 생성효율의 평가를 위해서, 이온 입자속의 측정을 더블 프로브를 이용하여 구하였다. 프로브 tip은 직경 0.5[mm], 길이 4[mm]의 텅스텐 재질로서 두 개의 tip사이는 세라믹관에 의해 전기적으로 절연시켰다. 이온 플럭스의 L 의존성을 조사하기 위해 NL평면상으로부터 60[mm]떨어진 하류부의 위치에서 프로브 측정을 행하였으며, 이온 입자속은 전류치로서 측정하였고, 데이터는 X-Y Recorder (YOKOHAMA 302523, 2pen, 50[μV/cm]~5[V/cm])로서 처리하였다. 우선 반경방향의 이온 플럭스 분포를 측정해서, 그 결과를 각각의 반경에 대해 적분함으로써 축방향의 전입자속을 구하였다.

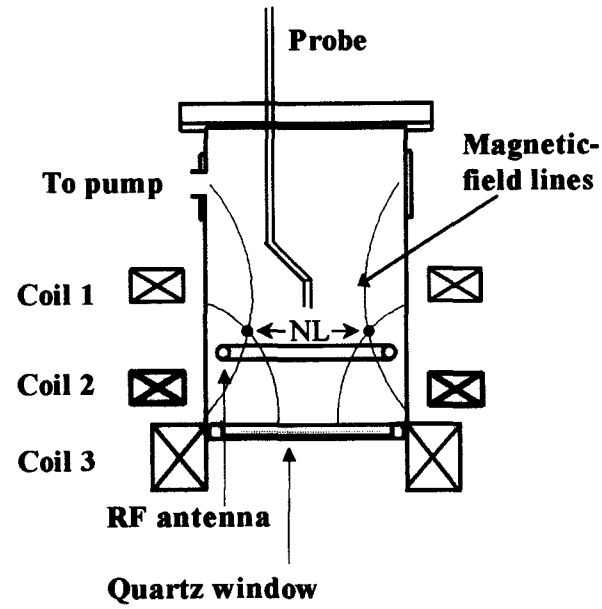
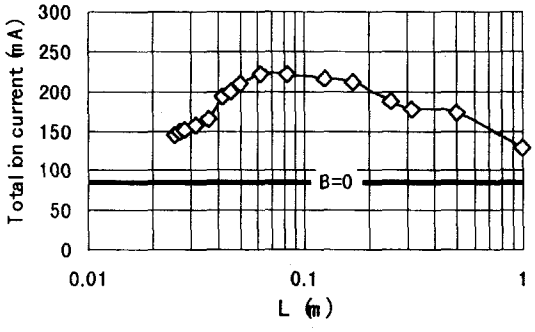


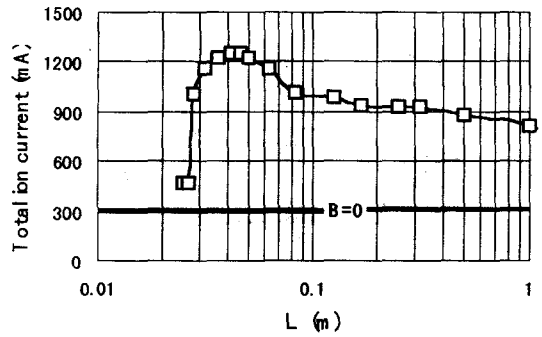
그림 3 실험장치의 개략도
Fig. 3 Experimental set-up

그림 4(a)는 Ar 가스압 0.5[mTorr]의 경우, (b)는 3[mTorr]의 경우, (c)는 18[mTorr]의 경우에 대하여, L에 대한 이온전류의 적분치를 플로트한 결과이다. 측정위치는 그림 3에서 알 수 있듯이, NL에서 윗방향으로 최대 자장강도의 위치부근이기 때문에, 여기를 통과하는 이온입자속은 그대로 윗쪽방향으로 전송되어 흘러나가버리는 것으로 생각할 수 있다. 정상상태에서는 입자의 손실과 생성이 평형을 유지하고 있기 때문에 측정이온의 입자속은 입자의 생성율을 나타내는 물리량으로서 평가할 수 있다. 그림 4의 (a)~(c)에 의해, L이 10[mm]이하에서는 플라즈마 생성이 최대로 되고, L의 최적치는 가스압이 높을수록 짧아지는 경향이 있음을 알 수 있었다. Yoshida씨는 환산전장강도 F치가 대략

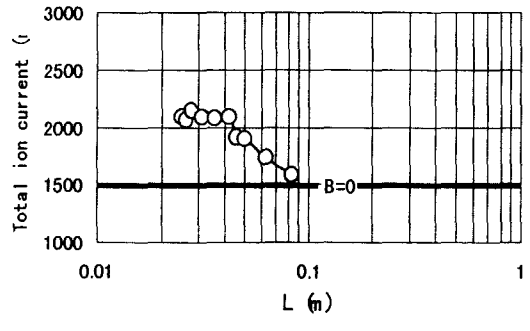
1 정도로 되는 조건이, 식(1)에서 기술된 전자의 운동이 가장 비선형적으로 되기 때문에, 전자가 효율적으로 가열(heating)되어 고밀도의 플라즈마가 생성될 수 있다고 설명하고 있다[1,5]. 본 실험에서도 L=10[mm]의 경우, F가 1정도의 값을 가지게 되므로 Yoshida씨의 이론으로 설명이 가능할 것 같으나, 실지 F치 이론이 무충돌조건 하에서 전자거동의 비선형성(혹은 카오스(Chaos))을 평가하는 것으로서, 실제 장치에서의 플라즈마의 생성에 결정적인 연관성이 있다고 보는 것은 다소 무리가 있다고 생각한다. 특히 실험결과가 나타내는 바와 같이 가스압의 의존성은 F치 이론으로서는 도출할 수 없다.



(a) 0.5 [mTorr]



(b) 3 [mTorr]



(c) 18 [mTorr]

그림 4 L의 변화에 대한 이온전류량

Fig. 4 Total ion current plotted against L

4. 전자거동의 시뮬레이션 및 고찰

지금까지 NL주변의 전자의 meandering motion에 관한 연구는 그림2(a)의 slab모델을 이용해서 수행되어져 왔다.

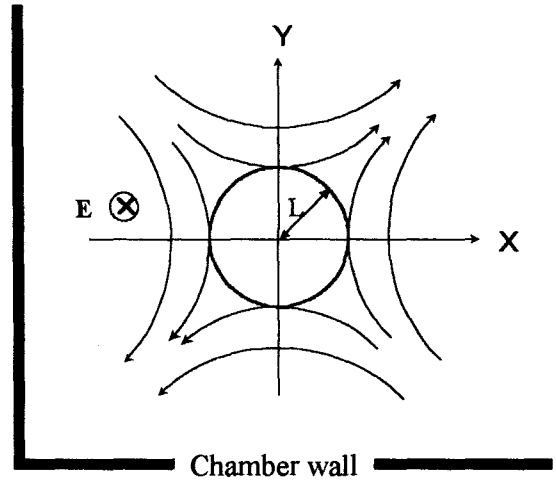
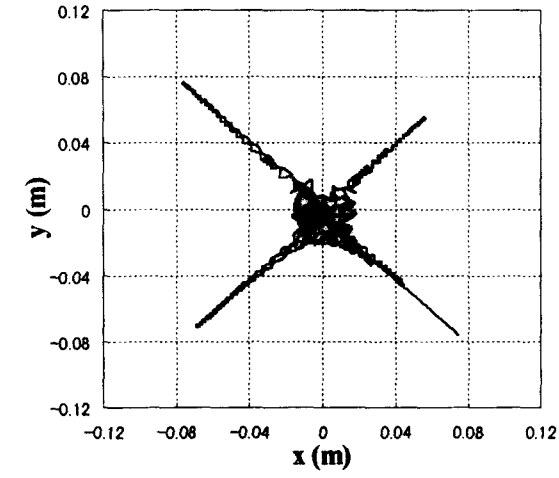


그림 5 3차원적 요소를 고려한 전장 및 자장의 계산 모델

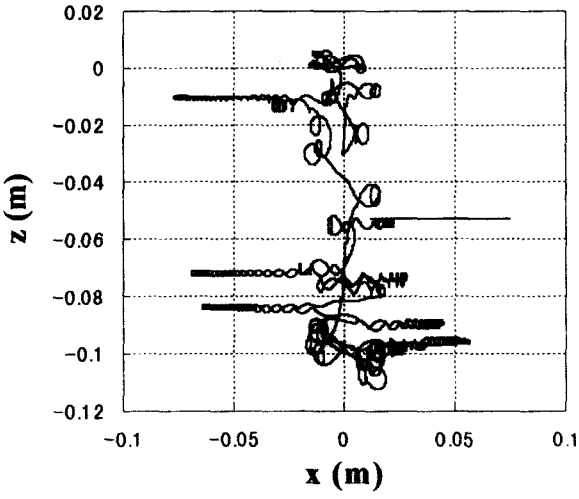
Fig. 5 3-dimensional Field configuration of the calculation

즉, 전·자장하의 전자의 궤적은, 식(1)의 2차미분방정식을 계산함으로써 구할 수 있다. Yoshida씨는 식(1)에서 전장항은 공간적으로 균일한 것으로 하고, 자장항은 NLD 플라즈마의 자장구조를 가장 간략화한 즉, 그림 2(a)와 같이 1차원적인 자장구조(형상이 널빤지 같다고 하여 slab형이라 함)를 모델로 하여, 식(2)로 수식화한 자장 항을 식(1)에 대입하여 계산하고 있다. 그러나, slab모델은 너무 간단하여 그림 4와 같은 자장(L)과 플라즈마 생성에 대한 실험적 사실을 설명할 수 없다. 본 연구에서는 NL부근의 전자거동을 보다 현실적으로 해석하기 위해, 그림 5에 나타낸 바와 같이 전·자장 모델을 제작하였다. 본 계산모델은 Yoshida씨의 1차원적인 계산모델을 베이스로 해서, 좀더 현실적인 파라메타(전장의 공간적 감쇠, 벽손실, 충돌)를 고려, 이를 수치적으로 계산식에 도입하여 새롭게 작성한 것이며, 이때 전자궤적을 구하기 위한 식(1)의 2차미분 방정식은 Runge-Kutta법7)에 의해 계산하였다. 먼저 자장은 $B=B_0(y/L, x/L, 0)$로 표현되며, slab 모델에서는 NL의 형상이 무한평판상으로 되는 반면, 여기서는 z축과 일치하는 무한선으로 되고, B_0의 면은 z축을 중심으로 하는 반경 L의 원통형의 면으로 된다. 유도전장은 z 축방향으로 향한다. 여기에 공간적 유한성의 효과로서 전장의 감쇠와 챔버벽의 존재를 식에 도입하였다. 전장은 NL로부터 벗어남에 따라 감량치 δ로서 지수 함수적으로 감쇠하는 것으로 가정하였으며($E=E_0 \exp(-r/\delta)$), r은 그림 5에서 원점인 NL로부터의 거리 $r=\sqrt{x^2+y^2}$에 해당하며, δ값은 자기 프로브에 의한 측정결과로부터 30[mm]로 하였다. 챔버벽은 y=-35[mm] 및 x=-50[mm]에 존재하는 것으로 하여, 전자가 벽면에 도달하면 재결합으로

소멸하는 것으로 가정, 계산이 종료되도록 하였다. 한편, Yoshida씨의 계산모델은 무충돌 영역에서의 전자거동을 논하고 있으나, 실제 공학적인 응용의 측면에서 볼 때, 더욱이 본 논문에서 목표로 하고있는 반도체 공정용 플라즈마 원의 조건에서는 충돌을 무시할 수 없다. 본 모델에서는 전자가 중성입자와 평균자유행정 λ에서 탄성충돌하는 것으로 하였으며, 충돌에 의해 운동방향이 랜덤으로 변하는 것으로 하였다. 그리고 전자거동의 해석에서는 특히 평균에너지 E_{av}의 관점에서 정리하였는데, 이것은 전자의 온도에 관한 양으로 전리반응에 의한 입자생성율에 관계하는 물리량으로서 가정하고 있다. 부연 설명하면, 플라즈마의 생성효율을 평가하는데 있어서, Yoshida씨가 전자거동의 카오스에 의한 가열(heating)[5]에 포인트를 두고 있는데 비해, 본 논문에서는 실제 프로세스의 동작 압력이 수~수십 [mTorr]범위에 해당하므로, 전자가 전·자장 하에서 에너지를 흡수하여 전리레벨 이상의 에너지에 도달하면 충돌전리한다는 관점에서 플라즈마의 생성을 논하고자 E_{av}로서 평가하였다.



(a) x-y 궤적



(b) x-z 궤적

그림 6 x-y면과 x-z면에 대한 전자운동 궤적의 계산예

Fig. 6 Electron trajectory in xy and xz plane

그림 6의 (a)와 (b)는 챔버벽의 존재를 고려하지 않은 경우의 x-y면과 x-z면에 대한 전자운동의 궤적을 계산한 예를 나타내고 있다. 전자의 거동은 y=±x의 면을 따라 L의 2배보다 외측의 영역에서는 자력선에 의한 나선운동으로 되며, 자장 미러(mirror)효과에 의해 자장이 높은 점에서 반사되어 다시 NL부근으로 돌아오는 운동을 반복하고있음을 알 수 있다. NL로부터 반경 2L의 범위밖에서는 전자 에너지의 증감은 거의 없고 전자가 RF전장에 의해 에너지를 수수하는 것은 ±2L의 범위내임을 알 수 있으며, 이것은 slab 계산 모델과도 일치하였다.

이 계산모델을 이용해서 다양한 조건 하에서 전자의 궤적을 추적하여, 그 평균에너지 E_{av}의 L 의존성을 조사하였으며, 결과를 그림 7에 나타내었다. 여기에는 A, B, C, C′, D의 5가지 조건 하에서 행한 결과를 하나의 그래프로 비교해서 나타내었다. A는 챔버벽이 없고, 전장은 공간적으로 일정하며, 충돌을 고려하지 않은 slab모델의 경우이다. B는 A에 챔버벽의 존재를 고려한 경우이며, C는 B에다 전장이 30[mm]의 감량치로 감쇠하는 경우에 해당한다. C′는 C에다 벽의 존재까지 고려한 경우이며, D는 그 위에 중성입자와의 충돌을 고려해서, 그 평균자유행정을 100[mm]로 한 경우이다. 각각의 계산에 있어서, 전자의 초기 에너지를 0.07[eV]로 하고 있으며, 초기속도의 방향은 랜덤화하였으며, 초기위치와 초기속도의 모든 경우에 대하여 전자 에너지의 평균치를 계산하였다. 그리고, 계산시간은 RF주기의 50배정도로 하였으며, 챔버벽이 존재하는 경우에는 상기와 같이 전자가 벽에 도달하는 시점에서 추적계산을 완료하였다. 그림 7에서 A의 경우에는, L이 길수록 E_{av}가 증대한다. 이것은 전자가 전장으로부터 힘을 받아 가속되는데, 힘을 받는 변위가 길수록, 두 물리량의 적(積)에 해당하는 에너지가 커지게 되기 때문이라 생각한다. B에서는 벽의 존재로 인해 최대 에너지에 도달하기 전에 소멸되는 효과가 나타나고 전체의 E_{av}가 감소하고 있다. 벽은 2면만 존재하고 있으며, 그 위치는 NL로부터 50[mm]정도에 고정되어 있다고 고려하고 있으므로, L > 50[mm]의 경우에서 벽의 존재의 영향이 크게 나타나, E_{av}가 감소되고 있음을 알 수 있다. C와 C′에서는 RF 전장이 감량치 30[mm]에서 지수 함수적으로 감쇠하는 것으로 가정하고 있기 때문에 E_{av}가 L=30[mm]에서 최대로 되고, 이 값보다 긴 L에 대해서는 급속히 감소하고 있음을 알 수 있다. 그리고 C와 C′는 거의 차이가 없었는데, 이는 전장의 감량이 에너지 감소의 가장 큰 요인으로 작용하고 있음을 시사한다. D에서는 전장의 감량 및 벽의 존재 그리고 중성입자와의 충돌까지 고려하고 있다. 이 때의 평균자유행정은 100[mm]로 하고 있으며, 이것은 대체로 Ar가스압 3[mTorr]의 경우에 해당한다. 즉, 이 결과는 그림 4(b)와 비교할 수 있다고 생각된다. E_{av}를 최대로 하는 L값은 10mm정도이하의 범위이며, 그림 4(b)와 잘 대응하고 있음을 알 수 있다. 이 경우의 전자의 거동을 조사하면, 전자의 에너지가 1[eV]정도의 경우, 전자는 RF의 1주기로부터 2주기사이에서 1회 중성입자와 충돌하였다. 이 충돌에 의해 NL부근에서의 가속된 전자가 벽의 방향으로 향할 확률이 증가해서 전자의 비행수명이 짧아지며, C의 경우보다 전체의 에너지가 감소함과 동시에 E_{av}를 최대로 하는 L값도 작아지게 한다. 한편, D에서 벽이 존재하지 않을 경우에는 C의 결과

와 거의 차이가 없었다. 이상의 결과로부터, 전장의 공간적인 감쇠, 전자의 운동범위의 공간적 제약(벽으로의 소멸) 및 중성입자와의 충돌, 이 3가지 효과를 동시에 고려하면 실험에서 얻어진 L의 최적값을 본 모델에 의해 재현할 수 있음을 알 수 있었다.

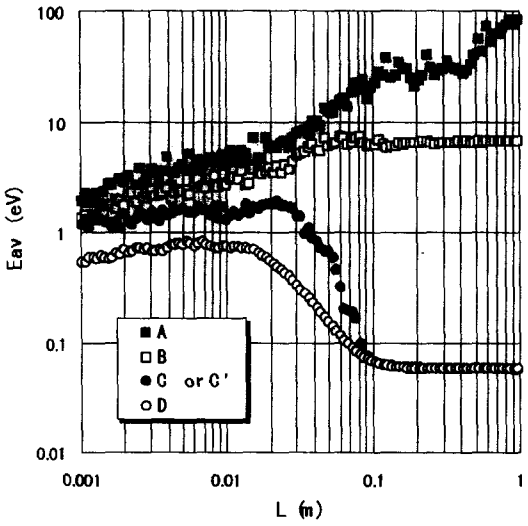


그림 7 전자의 평균 에너지 E_{av}의 L 의존성

A: 벽없음, 균일 전장, 무충돌

B: 벽존재, 균일 전장, 무충돌

C: 벽없음, $E=E_0 \exp(-r/\delta)$, $\delta=0.03$[m], 무충돌

C′ : 벽존재, $E=E_0 \exp(-r/\delta)$, $\delta=0.03$[m], 무충돌

D: 벽존재, $E=E_0 \exp(-r/\delta)$, $\delta=0.03$[m], 평균자유행정 0.1[m]

Fig. 7 Averaged electron energy E_{av} plotted against L

A: without wall, uniform E and collisionless

B: with wall otherwise the same as A,

C: without wall, $E=E_0 \exp(-r/\delta)$, $\delta=0.03$[m], collisionless,

C′ : with wall, $E=E_0 \exp(-r/\delta)$, $\delta=0.03$[m], collisionless,

D: C with a mean free path length 0.1[m]

본 연구에서는 NLD 플라즈마의 생성부에 해당하는 NL 주변의 전자거동을 해석함으로써 플라즈마의 최적 생성조건을 구할 수 있었으나, 플라즈마의 생성조건을 보다 정량적으로 유도하고, 실제 프로세스 응용에 있어서 효율적이고 정밀한 운전을 위해서는, 실험 및 이론 양방면에서 보다 많은 연구가 진행되어야할 필요가 있다. 특히 NLD 플라즈마의 전자거동을 고려하여 전자온도, 밀도의 분포 및 여기·전리과정에 관한 실험적 연구와 플라즈마 생성부에서 하류부까지 전체구조를 정량적으로 도출할 수 있는 3차원적 계산모델에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

5 요약 및 결론

본 연구에서는 프로세스용 플라즈마 원으로서의 NLD 플라즈마에 대해, 방전의 최적화 및 장치설계의 지침을 명확히 하기 위하여, 그 해석모델로서 3차원적 효과를 고려한 계산모델을 제안, NL주변의 전자거동에 대해 해석을 행하였다. 그리고, 이온입자속에 대한 측정실험을 통해 시뮬레이션과 실험결과를 비교하면서 플라즈마 생성효율의 최적화에 대하여 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

1) 기존의 slab 모델과 본 계산 모델을 비교하면, slab 모델에서는 전자가 NL을 중심으로 ±2L의 범위를 비선형적으로 왕복운동하는 것으로 나타난다. 이에 비해, 본 모델에서는 자력선을 따라 운동하는 새로운 궤적특성이 나타나고, 그 범위는 2L보다 훨씬 멀리 확장되고 있음을 알 수 있었다. 한편, NL에서 반경 2L의 범위밖에서는 에너지의 증감이 거의 없고, 전자가 RF전장에 의해 에너지를 얻는 것은 2L범위내라는 것은 slab모델과 일치하였다.

2) 실험적으로 자장강도를 넓은 범위에서 변화시켜가면서 NL과 ECR면까지의 거리 L과 플라즈마의 생성효율과의 관계를 조사한 결과, L이 10[mm]정도이하에서 플라즈마 생성효율이 최대로 되었고, L의 최적치는 가스압이 높을수록 짧아지는 경향이 있음을 확인할 수 있었다.

3) 이러한 실험결과를 설명하기 위해서, 다양한 초기조건(전자의 초기위치, 운동방향 등)에 대하여 전자의 궤적을 추적, 그때의 평균 에너지E_{av}를 L을 파라메타로 하여 정리한 결과, 전장의 공간적인 감쇠, 공간의 유한성(벽으로의 소멸) 및 중성입자와의 충돌의 3가지 효과를 계산모델에 고려하게 되면, 최적 L의 실험치를 재현할 수 있음을 알 수 있었다.

4) 기존의 slab 모델에서는 무충돌의 전자가열(electron heating)의 이론으로써 플라즈마의 생성을 논하였는데 비해, 본 논문는 실제 실험조건를 고려하여 얻어진 전자의 에너지 E_{av}의 관점에서 플라즈마의 생성효율을 평가하였으며, 프로세스 응용에서의 플라즈마 운전조건에 대한 보다 실제적이고 정량적인 결과를 얻을 수가 있었다.

향후 NLD 플라즈마의 전자거동을 고려하여 전자온도, 밀도의 분포 및 여기·전리과정에 관한 실험적 연구와 플라즈마 생성부에서 하류부까지 전체구조를 정량적으로 도출할 수 있는 3차원 계산모델에 대한 연구를 계속 수행해 나갈 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Z. Yoshida and T. Uchida, "Plasma Production Using Energetic Meandering Electrons", Jpn. Appl. Phys., Vol.34, pp.4213-4216, 1995.8

[2] T. Sakoda et-al, "Electron Temperature and Density Profiles in a Neutral loop Discharge Plasma", Jpn J. Appl. Phys., Vol36, pp.L67-L69, 1997.1

[3] T. Sakoda et-al, "Syudies of a Magnetic Neutral loop Discharge Based on Laser Diagnostics of Electron

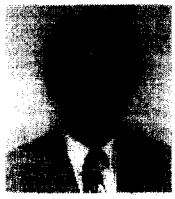
Behavior and Atomic Processes", Jpn J. Appl. Phys., Vol36, pp.6981-6985, 1997.1
[4] W. Chen et-al, "Dry Etch Process in Magnetic Neutral Loop Discharge Plasma", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37, pp.332-336, 1998.1
[5] Z. Yoshida, T. Uchida et-al, "Anomalous Resistence Induced by Chaos of Electron Motion and its Application to Plasma Production", Physical Review Letters, Vol.81, No.12, pp.2458-2461, 1998.9
[6] Y.M. Sung et-al, "Studies on the optimum condition for the formation of a neutral loop discharge plasma", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol.18, No.5, pp.2149-2152, 2000.9
[7] R. Hayano and T. Takahashi, "Computer in Physics", N.S.P.A. Press, Tokyo, pp.55-77, 1997

저 자 소 개

성 열 문 (成 烈 汶)

1966년 11월 2일 생. 1992년 2월 부산대 전기공학과 졸업. 1994.2 동 대학원 졸업(석사). 1996년 8월 동 대학원 졸업(공박). 1997.8-1999.7 일본큐슈대학Post- doc.(한국과학재단지원). 1998.8-1999.7일본 큐슈대 조수. 현재 일본 국립미야자키대학전기전자공학과 조수

Tel & Fax : +81-985-58-7350
E-mail : sym@ee.miyazaki-u.ac.jp



김 종 경 (金 鍾 經)

1943년 1월 8일 생. 1967년 2월 부산대 전기공학과 졸업. 1982.2 동아대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 2월 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 부경대 전기제어계측공학부 교수

Tel & Fax : 051-620-1433
E-mail : dhkim@pknu.ac.kr

박 정 후 (朴 正 后)

1945년 4월 8일 생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980~1983년 일본 구주대학 대학원 졸업(공박). 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수

Tel : 051-510-2369, Fax : 051-513-0212
E-mail : chpark@howon.cc.pusan.ac.kr