

자기중성선방전 시스템의 최적 플라즈마 생성조건에 관한 고찰

논 문
58-11-24

Investigation on Optimum Plasma Production Condition of a Magnetic Neutral Loop Discharge System

성 열 문*
(Youl-Moon Sung)

Abstract - In this study, the electron behavior was investigated numerically in order to obtain guidelines for design and operation of a new plasma source by a magnetic neutral loop discharge (NLD). The optimum plasma production was investigated by using a 3-dimensional simulation model which enables the electron behavior calculation from source region to downstream region. The results showed that the high-density plasma produced around the magnetic neutral loop (NL) is transferred from the NL region to the downstream region along magnetic force lines. Also the averaged electron energy is increased with the normalized RF electric field (F), which can be used to characterize the plasma production efficiency of NLD system. Considering the relation between F and plasma production, in-depth plasma control can be achieved at a given specific process condition.

Key Words : Magnetic Neutral Loop Discharge, Plasma production, Electron behavior, Electron energy

1. 서 론

반도체 공정 분야에서는 웨이퍼의 대 구경 화(>30[cm])와 나노레벨 (<1[μ m])의 초미세 가공기술이 요구되어 왔다. 이러한 관점에서 다양한 프로세스용 플라즈마 시스템들이 제안되어 왔으며, 그 중 자기 중성선 방전(Neutral Loop Discharge; NLD) 플라즈마 시스템은 대면적의 균일한 프로세스가 가능한 것으로써 주목을 받고 있다[1-4]. 자기 중성선 방전 시스템은 진공 조 주변에 배치된 3개의 전자코일에 의해 진공 조 내부에 자장강도 제로(zero)의 자기 중성선(Neutral Loop; NL)을 형성한다. 이 NL에 13.56 MHz의 고주파 전계를 인가하면, NL부근에서의 전자의 거동이 비선형적으로 되면서 전자가 효율적으로 가열되고, 낮은 압력 하에서도 고밀도의 플라즈마가 형성된다. NLD 시스템의 가장 큰 특징은 전자코일의 전류 값이나 그 배치에 따라, 기판에 대한 NL의 형성 위치나 형상을 임의로 변환시킬 수 있어서, NL의 동적 제어를 통한 대면적의 균일한 프로세스가 가능하다는[5, 6]. NLD 플라즈마 생성의 이론적 고찰로서는, slab형 자장을 베이스로 하는 계산모델이 잘 알려져 있다[1]. 그 후 실험적 요인을 고려한 전·자계분포 하에서의 연구결과들이 보고되어 왔다[7, 8]. 그리고 실험 연구로서 플라즈마 생성부에 해당하는 NL부근의 전자온도, 밀도분포 및 여기·전리과정에 관하여 다양한 조건에서의 고찰결과를 비롯하여[9, 10], NLD 플라즈마를 이용한 스퍼터링에의 새로운 시도에 대해서도 보고되어 왔다[11, 12]. 그리고 최근 들어 NLD

플라즈마는 기존의 Inductively Coupled Plasma (ICP)에 비해 저온 고밀도라는 장점이 활용되어[9, 10], 광메모리용 Micro lens 제조에서부터 Micro electro mechanical system (MEMS) 공정, 차세대 저유전율(low-k) 층간 절연 막 재료의 에칭공정 등에 이르기까지 미세가공 분야로 응용범위가 확대되고 있는 추세이다.[13-15]. 그러나 NLD 플라즈마에 대한 그 동안의 이론과 실험결과들을 검토하면, 임의의 실험조건 하에서 NLD 플라즈마의 생성 및 구조, 그리고 NL 부근에서의 전자거동에 대한 개요는 설명할 수 있는 반면, 프로세스 응용의 관점에서 플라즈마의 최적 생성조건에 대하여 체계적으로 정리된 사례는 아직 없다.

본 연구에서는 실제 플라즈마 운전조건 하에서의 전자의 거동을 실험 및 이론, 양 측면에서 고찰하여 NLD 플라즈마의 최적 생성조건과 장치설계의 지침을 명확히 하고자 한다. NLD 플라즈마의 최적 생성조건을 규명하기 위해, 그 해석 모델로서 실제 운전조건을 고려한 3차원적 계산모델을 제작하여 NLD 플라즈마의 최적 생성조건에 대하여 검토하였다.

2. NLD 플라즈마의 생성과 시스템 개요

NLD 플라즈마 시스템은 진공 챔버, 자속밀도 zero의 NL을 형성하기 위한 전자코일 시스템과 13.56 MHz의 고주파 전원장치로 구성된다. 그림 1에 자장 및 고주파 전계형성을 위한 코일과 안테나 배치를 나타내었다. NL을 포함한 자장은 동축 상에 배치된 3개의 전자코일으로써 형성된다. 먼저 코일 1과 3에 동일 방향의 전류를 흘려 단순 미러(mirror) 자장을 형성시키고 코일 2에 반대방향의 전류를 흘리면 챔버 내부 코일 2의 평면상에 자속밀도가 zero가 되는 NL이 링(Ring) 형태로 형성된다. 이렇게 형성된 NL에 고주파(RF)

* 정 회 원 : 경성대학교 전기전자공학과 부교수 · 공박

E-mail : ymsung@ks.ac.kr

접수일자 : 2009년 10월 6일

최종완료 : 2009년 10월 12일

안테나에 의해 고주파 전장을 인가하면 링 형태의 NLD 플라즈마가 생성된다. 그리고 3개의 코일 전류를 제어함으로써 임의의 위치에 임의의 반경의 플라즈마 링을 자유로이 생성시킬 수 있다.

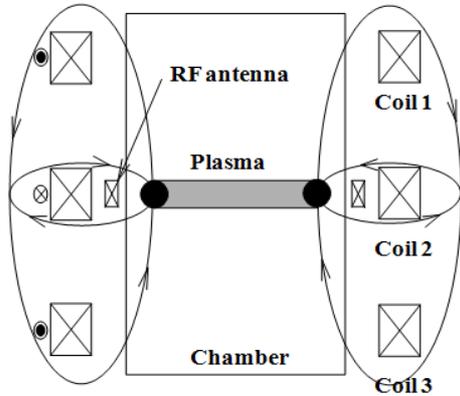


그림 1 NLD 발생을 위한 코일과 RF 안테나의 배치도
 Fig. 1 Arrangement of magnetic coil and RF antenna for NLD production

그림 2와 3에 각각 코일 2의 평면상에 발생된 자장분포와 NLD 플라즈마의 방전형상을 나타내었다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 NL 부근에서 생성된 플라즈마가 자력선을 따라 Downstream 하고 있음을 알 수 있다.

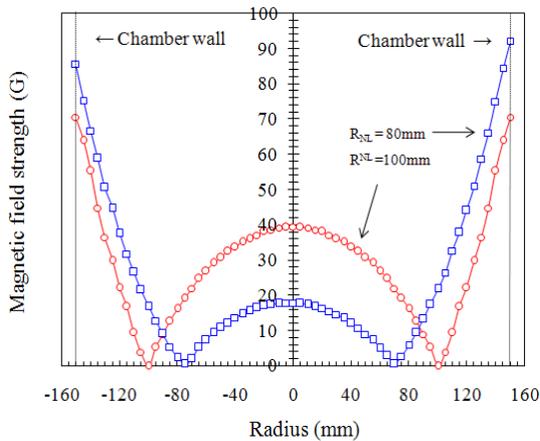


그림 2 NL 평면상의 자속밀도 분포.
 Fig. 2 Distribution of magnetic flux densities on NL plane.



그림 3 NLD 플라즈마의 방전형상 예
 Fig. 3 Example of NLD plasma image.

NLD 플라즈마 생성에 관해서는, NL주변의 전자거동을 이론적으로 해석한 slab모델이 잘 알려져 있다[1, 4]. 전자거동에 대한 수치해석은 식 (1)의 전·자계 하에서의 전자의 운동방정식을 이용한 Runge-Kutta법[16]에 의해 구할 수 있다.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

여기서 \vec{E} , \vec{B} , e 및 m_e 는 각각 전계[V/m], 자계[T], 전하량[C] 그리고 전자의 질량[kg]이다. 그리고 NL부근의 자장 구조를 가장 간단히 구현하면 식 (2)와 그림 4로써 나타낼 수 있다. 여기서 $B_0(=m_e\omega/e)$ 와 L 은 각각 ECR 자장 값과 ECR 자장점까지의 거리를 나타낸다. 예를 들어 전계주파수 (ω) 13.56MHz의 경우 전자공명 (Electron cyclotron resonance; ECR) 자장 값은 약 4.8Gauss가 되며, 0~4.8Gauss 점까지의 거리를 L 로 두어 이 L 값에 의해 자장의 기울기(세기)를 수치적으로 표현할 수 있다[1].

$$\vec{B} = B_0/L [0, x, 0] \quad (2)$$

slab 계산모델에 의해 초기치 B_0 와 L 을 실제 실험조건을 고려하여 각각 4.8Gauss와 4mm로 해서 전자의 운동 궤적을 구하면 그림 5의 계산 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 NL 영역의 전자는 $-2L < x < +2L$ 의 범위에서 비선형적으로 곡절(曲折)된 운동(meandering motion)을 한다. 이 운동범위는 ECR영역을 포함하기 때문에 무 충돌 조건에서도 전자는 RF전계로부터 에너지를 효율적으로 얻을 수 있다[1]. 그리고 아래 식 3과 같이 전계강도(E_0), 주파수(ω), 자계(B_0 , L)를 파라메타로 환산전계 F 값을 구할 수 있는데, slab 모델에서는 전자의 가열(Electron heating)이 최적으로 되는 조건으로서 $F \approx 1$ 을 제시하고 있다[1, 9, 10].

$$F = \frac{E_0}{L\omega B_0} \quad (3)$$

예를 들어, 전계주파수 $\omega=2\pi \times 13.56\text{MHz}$, 전계강도 $E_0=200\text{V/m}$, 13.56MHz에 대한 ECR 자장 값 $B_0=4.8\text{Gauss}=4.8 \times 10^{-4}\text{T}$ 일 때, $L(0 \sim 4.8\text{Gauss}$ 점까지의 거리)이 약 5mm가 되도록 자장강도를 설정하면 $F=0.98 \approx 1$ 이 되어 전자가 효율적으로 가열되어 최적의 플라즈마 생성조건이 된다.

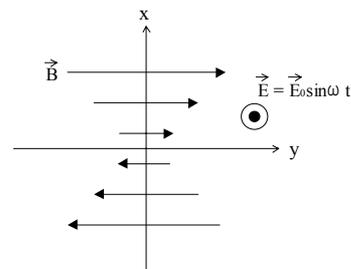


그림 4 NL부근의 자장 및 전장의 배치 (slab 모델)
 Fig. 4 Arrangement of electric and magnetic field around NL (slab model)

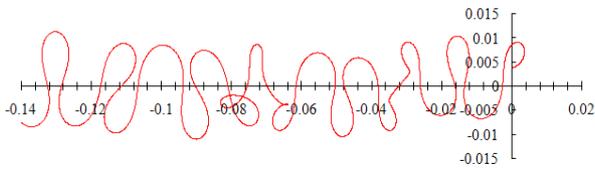


그림 5 NL근방의 전장 및 자장의 모델화된 배치도와 전자의 운동궤적

Fig. 5 Arrangement of electric and magnetic field around NL and electron orbit.

3. 전자거동의 시뮬레이션 및 고찰

NLD 플라즈마에서의 전자 거동에 관한 연구는 전술한 바와 같이 그림 4의 slab모델을 베이스로 한 연구가 잘 알려져 있다. 전·자계 하에서의 전자의 궤적은 식 (1)의 2차 미분방정식을 계산함으로써 구할 수 있다. slab 모델에서는 식(1)에서 전계 항은 공간적으로 균일한 것으로 하고, 자계 항은 NLD 플라즈마의 자장구조를 가장 간략화한 즉, 그림 4와 같은 1차원적인 자장 구조를 모델로 하여, 식 (2)로 수식화한 자계 항을 식(1)에 대입하여 계산하고 있다. 그러나 slab모델은 너무 단순하여 그동안 수행되어진 많은 실험적 결과들을 설명하는데 한계가 있다. 예를 들어, 참고문헌 [7]의 실험결과에 의하면 NLD 플라즈마의 생성을 최대로 하는 최적의 자장(L)이 존재하는 것으로 보고하고 있다. 그러나 slab 모델로써는 자장(L)과 플라즈마 생성에 대한 실험 결과를 설명할 수 없다. 그리고 참고 문헌 [6], [9] [10]등, 그동안의 선행연구에서 보고되고 있는 NLD 플라즈마 내에서 전자밀도의 피크가 전자온도의 피크영역보다 내측으로 쉬프트되는 실험결과에 대해서도 설명할 수 없다. 본 연구에서는 NLD 플라즈마내의 전자거동을 보다 현실적으로 해석하기 위해, 3차원적인 자계분포 계산 값을 베이스로 하여 실제 실험적 파라메타(전계 감쇠, 벽 손실, 충돌 등)를 고려한 계산모델을 개발하였다. 먼저, 전자 거동의 해석을 위해서 식(1)의 2차 미분 방정식의 계산은 slab 모델과 동일하게 Runge-Kutta법을 도입하였다. 그림 6은 NL반경 100mm의 경우($R_{NL}=100\text{mm}$)의 NLD 챔버내의 자기력선 분포를 r-z 단면으로 나타낸 것이다. 반경 r은 $r=(x^2+y^2)^{1/2}$ 로 되고, NL 반경은 100mm이다. 그림에서 알 수 있듯이, NL반경 100mm의 경우($R_{NL}=100\text{mm}$), 자계 zero점의 좌표는 r-z 평면에서 $r=100\text{mm}$, $z=0\text{mm}$ 로 된다. 자계분포 계산은 식 (3)의 Biot-Savart's law을 이용하였다.

$$\Delta \vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\Delta \vec{s} \times \vec{d}}{d^3} \quad (3)$$

여기서, ΔB [T]는 루프 전류 I [A]가 흐를 때 단위 선 전류(Δs)에 의해 거리 d [m] 만큼 떨어진 지점에 발생하는 자속밀도이고, μ_0 는 투자율이다.

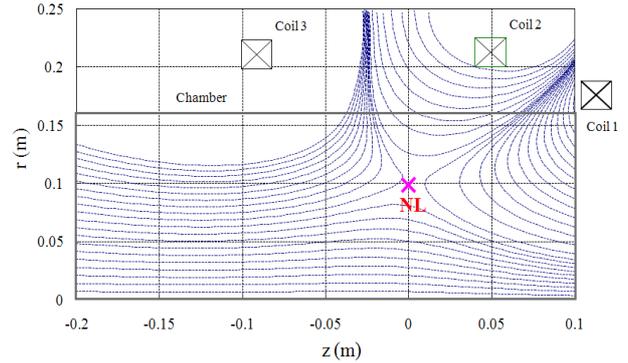


그림 6 산출된 자기력선 분포 ($R_{NL}=100\text{mm}$).

Fig. 6 Calculated magnetic field lines ($R_{NL}=100\text{mm}$).

그림 7에서는 고주파 안테나에 의해 발생된 챔버 내 유도전계 분포를 3차원적으로 계산한 결과를 나타내었다. 챔버 내 RF 안테나의 위치는 $r=130\text{mm}$, $z=5\text{mm}$ 평면상에 위치하고 있으며, 전자계 유도 관계식으로부터 계산되었다. 계산과정을 요약하면 다음과 같다. 먼저 식 (4)의 맥스웰 관계식(Maxwell's equation)으로부터 RF전계 \vec{E} 와 자계 \vec{B} 가 산출되고, 자계 \vec{B} 는 식 (5)와 (6)의 벡터 포텐셜(vector potential; \vec{A})의 계산으로부터 3차원적으로 구할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{B} = j\omega\mu_0 \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (5)$$

$$A_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_c \frac{i \cdot ds_\theta}{d} \quad (6)$$

여기서 A_θ [Wb/m]는 RF 안테나 루프에 전류 i [A]를 흘렸을 때, 단위 루프 ds_θ 로부터 거리 d [m] 떨어진 위치에서의 벡터 포텐셜이며, μ_0 는 진공 투자율이다. 본 연구에서 RF 안테나에 인가되는 전류는 Rogowski형 전류 프로브에 의해 얻어진 6.3A로 하였다. 그리고 유도전계는 패러데이 법칙(Faraday's law)에서 z성분을 고려한 식 (7)~(9)를 이용하여 산출할 수 있다.

$$B_z = \mu_0 H_z \quad (7)$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial r E_\theta}{\partial r} = j\omega\mu_0 H_z \quad (8)$$

$$E_\theta = E_{\theta 0} e^{-\sqrt{z^2+(r_0-r)^2}/\delta} \quad (9)$$

여기서 r_0 는 RF 안테나의 반경이고, δ 는 전계의 공간적 감쇠치이다. 본 연구에서 자기 프로브법을 이용하여 RF 안테나의 중심에서 NL 포인트까지 직접 측정하여 구한 $\delta=5\text{mm}$

를 계산식에 도입하였다. 계산결과로부터 얻어진 NL영역의 전계는 약 240 V/m로 나타났다. 한편, 챔버 벽에서는 전자가 벽면에 도달하면 재결합으로 소멸하는 것으로 가정, 계산이 종료되도록 하였다. 그리고 slab 계산모델은 무충돌 영역에서의 전자거동을 논하고 있으나, 실제 반도체 공정용 플라즈마 원의 조건에서는 충돌을 무시할 수 없다. 본 계산 모델에서는 전자가 중성입자와 평균자유행정 λ 에서 탄성충돌하며 그로 인해 운동방향이 랜덤으로 변하는 것으로 하였다. 그리고 전자거동의 해석에서는 특히 평균에너지 E_{av} 의 관점에서 정리하였는데, 이것은 전자의 온도에 관한 양으로 전리반응에 의한 입자 생성 율에 관계하는 물리량으로서 가정하고 있다. 즉, 실제 프로세스의 동작 압력이 수~수십 [mTorr] 범위에 해당하므로, 전자가 에너지를 흡수하여 전리레벨 이상의 에너지에 도달하면 충돌 전리한다는 관점에서 플라즈마의 생성을 논하고자 E_{av} 로서 평가하였다.

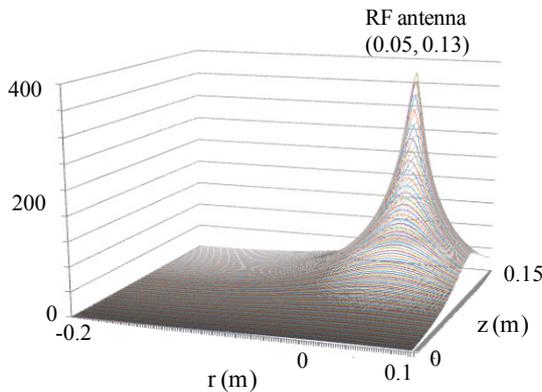


그림 7 산출된 전계 분포.
Fig. 7 Calculated electric field distribution.

그림 8은 챔버 내 r-z면에 대한 전자운동의 궤적을 계산한 예를 나타내고 있다. 전자의 거동은 자력선에 의한 나선운동으로 되며, 자장 미러(mirror)효과에 의해 자장이 높은 점에서 반사되어 다시 NL부근으로 돌아오는 운동을 반복하고 있음을 알 수 있다. 그림 5의 slab 계산모델과의 차이점을 들면, slab모델에서는 NL부근에서의 전자의 운동반경은 주로 $\pm 2L$ 이내인데 비해, 본 연구의 3차원적 계산모델에 의하면, 전자는 자력선을 따라 $\pm 2L$ 을 벗어나 챔버 벽 근방까지 훨씬 먼 거리를 운동하게 됨을 알 수 있다. 그러므로 slab 모델에서와 같은 $\pm 2L$ 범위 내에서의 연속적인 meandering 운동은 일어나지 않고, NL부근의 전자는 RF 전계로부터 에너지를 얻으면서, 자력선을 따라 하류부로 Downstream하는 것으로 나타났다. 그리고, NL반경 내측에 위치한 전자의 경우($r=50\text{mm}$ 부근) 에너지의 큰 변화없이 자력선을 따라 r 방향으로 왕복운동을 반복하는 전형적인 미러 자장내에서의 전자의 운동을 보여주고 있다. 이 결과는 그림 6의 자기력선 분포에 나타낸 바와 같이, NL의 내측에 형성된 미러 자장에 의해 전자들이 구속되는 것으로 보이며, 이러한 결과는 이전에 발표되었던 연구결과 중에서 slab모델로써는 확인할 수 없었던 NLD 플라즈마에서 전자밀도 분

포가 NL 반경 내측에 피크를 가지는 실험결과[6, 9-10]에 대해 잘 설명해주고 있다. 한편, NL로부터 반경 2L의 범위 밖에서는 전자 에너지의 증감은 거의 없으며, 전자가 RF전계에 의해 에너지를 수수하는 것은 $\pm 2L$ 의 범위 내임을 알 수 있었으며, 이것은 slab 계산모델과도 일치하였다.

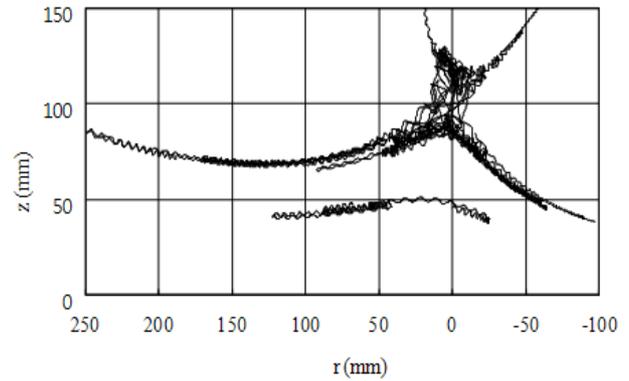


그림 8 챔버 내 r-z면에 대한 전자운동 궤적의 계산 예.
Fig. 8 Electron trajectory in rx plane of the chamber.

그림 9는 본 계산모델을 이용해서 다양한 조건 하에서 전자의 거동을 추적하여, 그 평균에너지 E_{av} 의 F 의존성을 조사한 결과를 나타내고 있다. 앞서 언급한 바와 같이, slab 계산모델에서는 식 (3)의 환산전계 F값을 구하여 $F \approx 1$ 이 되는 조건이 NLD 플라즈마의 생성이 최적으로 되는 것으로 명시하고 있다[1, 9, 10]. 본 연구의 3차원적으로 산출된 그림 9의 계산결과에 의하면, 전자의 가열(Electron heating) 혹은 평균 에너지 E_{av} 가 최대가 되는 조건은 $F \approx 1$ 로써 규격화되지 않으며, F값을 이루는 각각의 파라메타 E_0 , ω 및 L에 대해서, E_{av} 가 최대가 되는 F값이 각각 존재하는 것으로 나타났다. 그림 9에서 알 수 있듯이, 전계 E_0 를 가변시켜 F값을 증가시키면 E_{av} 도 비례적으로 증가하며, 자계규배 L의 경우, F값이 약 0.5가 되는 조건에서 E_{av} 가 최대가 되는 것으로 나타났다. 이 결과는 참고문헌 [7]의 실험결과와도 잘 일치한다. 주파수 ω 는 F값을 변화시킬 수는 있으나, E_{av} 는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 단, ω 에 의해 F값을 증가시키면 E_{av} 의 변동 폭이 서서히 증가함을 알 수 있다. 이상의 결과로부터, slab모델에서 NLD 플라즈마의 생성부에 해당하는 NL주변의 전자거동을 해석함으로써 F값을 통해 최적 플라즈마 생성 조건을 제시할 수 있지만, 프로세스 응용의 관점에서 플라즈마 운전조건에 대한 보다 실제적이고 정량적인 결과를 얻기 위해서는 본 연구에서 제시하는 바와 같이 플라즈마 생성부에서 하류 부까지 전체구조를 정량적으로 도출할 수 있는 3차원적 계산모델에 의한 체계적인 연구가 요구됨을 확인할 수 있다. 한편, NLD 시스템의 가장 큰 특징으로서 기판에 대한 NL의 형성 위치나 형상을 임의로 변환시킬 수 있다는 점을 들 수 있는데, 이러한 플라즈마의 동적제어에 따른 제반 특성을 본 계산 모델을 적용하여 해석하기에는 좀 더 보완과 개선이 필요하다. 이 부분에 대해서는 향후 계속해서 연구를 진행해나갈 예정이다.

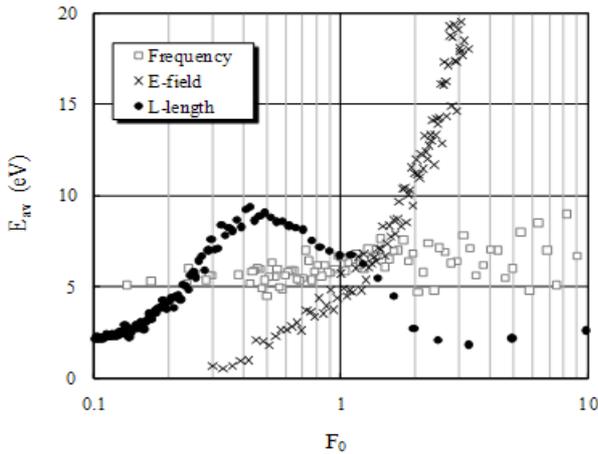


그림 9 전자의 평균 에너지 E_{av} 의 F 의존성
 Fig. 9 Averaged electron energy E_{av} plotted against F

4. 결 론

본 연구에서는 NLD 플라즈마 시스템을 대상으로 플라즈마 생성의 최적화와 장치설계의 지침을 명확히 하기 위하여, 그 해석모델로서 플라즈마 생성부에서 하류부에 이르기까지 전체구조를 정량적으로 도출할 수 있는 3차원 계산모델을 제안하였으며, NL주변을 포함한 플라즈마 내의 전자거동과 플라즈마 생성효율의 최적화에 대하여 검토하였다. 기존의 slab 모델과 본 계산 모델을 비교하면, slab 모델에서는 전자가 NL을 중심으로 $\pm 2L$ 의 범위를 비선형적으로 왕복 운동하는 것으로 나타난다. 이에 비해, 본 모델에서는 자력선을 따라 $2L$ 보다 훨씬 멀리 운동하며, NL 반경 내측에서 미러 자장에 의해 전자가 구속되는 궤적특성도 확인할 수 있었다. 한편, NL에서 반경 $2L$ 의 범위 밖에서는 에너지의 증감이 거의 없고, 전자가 RF전장에 의해 에너지를 얻는 것은 $2L$ 범위 내라는 것은 slab모델과 일치하였다. 그리고 slab 계산모델에서는 환산전계 F 값이 $F \approx 1$ 이 될 때 플라즈마의 생성이 최적으로 되는데 비하여, 본 연구의 3차원적 계산모델에 의하면, F 값을 이루는 각각의 파라메타 E_0 , ω 및 L 에 대해서, E_{av} 가 최대가 되는 F 값이 각각 존재하는 것으로 나타났다. 즉, 기존의 slab 모델에서 무 충돌 전자가열의 이론으로 플라즈마의 생성을 논하는 것과는 달리, 본 논문은 실제 실험조건을 고려하여 얻어진 전자의 에너지 E_{av} 의 관점에서 플라즈마의 생성효율을 평가하였고, 이를 통해 프로세스 응용에서의 플라즈마 운전조건에 대한 보다 실제적이고 정량적인 결과를 얻을 수가 있었다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 경성대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Z. Yoshida, T. Uchida et-al, "Anomalous Resistance Induced by Chaos of Electron Motion and its Application to Plasma Production", Physical Review Letters, Vol.81, No.12, pp.2458-2461, 1998.
 [2] Wei Chen et al., "Dry Etch Process in Magnetic Neutral Loop Discharge Plasma," Jpn. J. Appl. Phys. Vol.37, pp.332-336, 1998.
 [3] W. Chen et al., "Application of magnetic neutral loop discharge plasma in deep silica etching," J. Vac. Sci. Technol. A, Vol.19, pp.2936-2940, 2001.
 [4] A. V. Arsenin, V. G. Leiman and V. P. Tarakanov, "Heating of electrons in a high-frequency inductive neutral-loop discharge," Journal of Communications Technology and Electronics, Vol.52, pp.906-909, 2007.
 [5] Hideo Tsuboi and Seiji Ogata, "Observation of Characteristics of Magnetic Neutral Loop Discharge Plasma Appearing at Antenna in RF Circuit," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, pp.7475-7477, 2007.
 [6] D. O. Connell, T. Gans, D. L. Crintea, U. Czarnetzki, and N. Sadeghi, "Plasma dynamics in an inductively coupled magnetic neutral loop discharge," Plasma Sources Sci. Technol., Vol.17, 024022, 2008.
 [7] 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.
 [8] Y. M. Sung and Chikahisa Honda, "Studies on the plasma localization of a magnetic neutral loop discharge using normalized radio frequency electric field," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.20, pp.1457-1464, 2002.
 [9] T. Sakoda et al, "Electron Temperature and Density Profiles in a Neutral loop Discharge Plasma", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, pp.L67-L69, 1997.
 [10] 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., Vol.36, pp.6981-6985, 1997.
 [11] Y. M. Sung et al., "Modeling of the Electron Motion in a Capacitively Coupled Magnetic Null Plasma,"IEEE Transaction on Plasma Science, Vol.30, pp.142-143, 2002.
 [12] Y. M. Sung et al., "Studies of a magnetic null discharge plasma for sputtering application," Surface & Coatings Technology, Vol.172, pp.178-182, 2003.
 [13] A. Kouchiyama et al., "Optical recording using high numerical aperture microlens by plasma etching", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.40, pp.1792-1793, 2001.
 [14] Y. Morikawa et al., "Control of surface reaction on highly accurate low-k methylsilsequioxane etching process", Jpn. Appl. Phys., Vol.41, pp.

L1406-L1408, 2002.

[15] Taijiro Uchida and Satoshi Hamaguchi, "Magnetic neutral loop discharge (NLD) plasmas for surface processing", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.41, No.083001, pp.1-21, 2008.

[16] 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 2일생. 1992. 2. 부산대학교 전기공학과 졸업(학사). 1994. 2. 동대학교 대학원 졸업(석사). 1996. 8. 동대학교 대학원 졸업(공박). 1998. 7. 일본 Kyushu 대학 Post-doc.(한국과학재단지원). 1999.7 Kyushu 대학 조수. 2006. 2 Miyazaki 대학 전기전자공학과 조교수. 현재 경성대학교 전기전자공학과 부교수.

관심분야: 플라즈마 및 에너지변환 소자

Tel : 051-663-4777

Fax : 051-624-5980

E-mail : ymsung@ks.ac.kr