

고주파 유도결합 플라즈마의 전자에너지 분포함수 특성에 관한 연구

황 동원●, 하 장호, 전 용우, 최 상태*, 이 광식, 박 원주, 이 동인
영남대학교 전기전자 공학부, 경주대학교 컴퓨터 정보공학부*

A study on the characteristic of Electron Energy Distribution function of the Radio-Frequency Inductively Coupled Plasma

(Dong-Won Hwang●, Chang-Ho Ha, Yong-Woo Jeon,
Sang-Tae Choi*, kwang-sik Lee, Won-Zoo Park, Dong-In Lee)
Dept.of Electrical & Electronic Engineering of Yeungnam University
Dept.of Computer information Engineering of Kyong-Ju University*.

Abstract - Electron temperature, electron density and electron energy distribution function were measured in Radio-Frequency Inductively Coupled Plasma(RFICP) using a probe method. Measurements were conducted in argon discharge for pressure from 10 mTorr to 40 mTorr and input rf power from 100W to 600W and flow rate from 3 sccm to 12 sccm. Spatial distribution of electron temperature, electron density and electron energy distribution function were measured for discharge with same aspect ratio ($R/L=2$). Electron temperature was found to depend on pressure, but only weakly on power. Electron density and electron energy distribution function strongly depended on both pressure and power. Electron density and electron energy distribution function increased with increasing flow rate. Radial distribution of the electron density and electron energy distribution function were peaked in the plasma center. Normal distribution of the electron density, electron energy distribution function were peaked in the center between quartz plate and substrate. These results were compared to a simple model of ICP. finally, we found out the generation mechanism of Radio-Frequency Inductively Coupled Plasma.

1. 서 론

플라즈마 프로세스에 대한 요구는 점점 더 크게 되었고, 이러한 요구들 중에서 미세화와 대면적화가 급속도로 진행됨으로서, 저압력에서 보다 넓은 면적의 균등한 플라즈마를 생성할 수 있는 새로운 고효율 플라즈마원(Plasma Source)의 연구·개발이 필요하게 되었다. 고주파 유도결합 플라즈마(RFICP)는 이러한 요구를 잘 만족시키는 플라즈마원이라고 알려져 있다. 따라서 플라즈마의 균일성과 밀도를 완벽하게 활용하기 위해 모델들을 개발하는 것이 필요하고, 방전의 쳐적화, 효율화 규명에 체계적 이해를 도모해야 할 것이다.

본 연구에서는 단탕첨법에 의한 전자온도, 전자밀도를 측정하고, 전자에너지 분포함수(EEDF)를 교류 중첩법을 사용하여 이온화 및 신리 에너지의 분포를 일으키는 다양한 작용과 역할의 정보를 산출하고, 전달특성과 충돌작용 같은 플라즈마의 집합적인 특성을 이해하고자 한다.

2. 본 론

2.1 측정값과 그 평가

측정한 푸로브의 전류로 부터 전자온도 T_e 를 구하고, 식 (1)에 의해 전자밀도 N_e 를 구한다.

$$N_e(\text{cm}^{-3}) = 3.73 \times 10^{11} \frac{I_{\infty}(\text{Amp})}{S(\text{cm}^2)[T_e(\text{eV})]^{1/2}} \quad (1)$$

또, 플라즈마 내부의 전자에너지 분포는 Druyvesteyn 해석법으로 식(2)와 같이 전자에너지 분포함수를 $f(v)$ 를 구한다.

$$f(v) = 1,264 \times 10^{14} \cdot k^{-2} \cdot \frac{v^{1/2}}{n_e A_p} \frac{d^2 I_e}{d t^2} \quad (2)$$

2.1.1 실험장치 및 측정방법

본 실험에 사용한 고주파 유도결합 플라즈마 발생장치의 기본구성은 크게 나누어, 1) 고주파를 발생시키는 고주파 전원, 플라즈마 및 부하 임피던스와의 매칭을 위한 매칭박스(Matching Box), 2) 방전을 일으켜 플라즈마를 생성하는 진공관, 3) 가스용기와 유량 조절기(Massflow controller : MFC)로 구성되어 진공관에 사용가스를 공급하는 가스부, 4) 로터리 펌프(RP)와 터보분자 펌프(TMP)등의 배기부로 이루어진다.

진공관은 길이 400 [mm], 직경 300 [mm]의 스텐레스 스틸로 설계·제작하였고, 푸로우브 측정법에 적당한 구조로 되어있다. 진공관 내부에는 박막 가공을 행할 때 시료를 고정하는 웨이퍼 홀더(wafer holder)가 있으며, 기판은 상하로 움직일 수 있도록 하였다. 그리고, 진공관 상부에는 안테나 코일을 설치하기 위하여 직경 280 [mm], 두께 25 [mm]의 원판형 석영창을 두었고, 고주파 전원을 공급받는 안테나 코일은 고주파 전원과 플라즈마를 전자기적으로 결합시키는 유도결합소자로서, 폭 20 [mm], 두께 0.5 [mm]의 동판을 와권상으로 20° [mm] 간격으로 5회 감은 코일을 사용하였다.

그리고, 고주파 전원에서 발생된 13.56 [MHz]의 고주파는 가능한 한 진공관과 가까운 위치로 테프론을 사용한 내열동축케이블에 의해서 매칭박스를 사이에 두고 안테나

코일에 보내어 진다. 안테나 코일 상부에는 코일과 케이블의 냉각을 위하여 강제공냉팬을 설치하였다.

플라즈마의 발생방법으로서는 로터리 펌프와 터보분자펌프를 사용하여, 진공관 내부를 1.0×10^{-6} [Torr] 까지 배기한 후, 유량조절기와 니들 밸브(needle valve)를 사용하여 일정 유량(5 [sccm])의 고순도 아르곤 가스(순도 99.999 [%])를 진공관 내로 유입한다. 그 후, 콘트롤 밸브(control valve)로써 진공관 내의 압력을 원하는 값 ($10^{-2} \sim 10^{-3}$ [Torr])에 일정하게 유지한다. 진공관내 가스 압력은 피라니 게이지(Pirani Gauge)와 바라토론 게이지(Baratron Gauge)로서 측정하였다. 그리고, 고주파 전원을 매칭박스를 통해 안테나 코일에 인가하여 플라즈마를 발생시킨다. 이 때에 반사전력은 0 으로 되는 것을 확인하고, 반사가 있는 경우에도 입사전력의 5 [%] 이내가 되도록 매칭박스를 조정하였다.

그림 1은 전자에너지 분포를 계측하기 위한 개략도로써 DC Power supply로 직류전압을 공급하고, Sweep generator에 미소 전폭을 가진 교류전압을 중첩하여 미분기를 통하여 멀티메타로 전류값을 구한다.

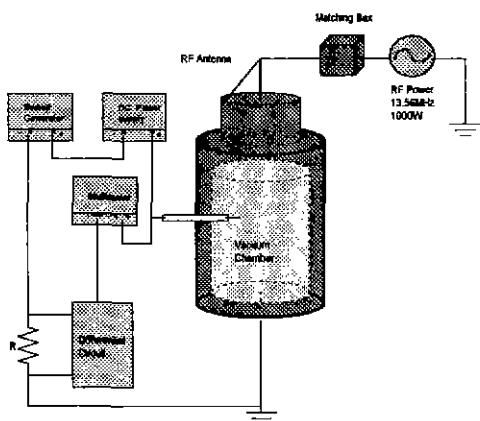


그림1 전자에너지 분포 측정 개략도

2.2 실험결과 및 고찰

전자에너지 분포의 입력파워 의존성과 가스압력 의존성, 유량 의존성, 반경방향 공간분포 및 축방향 공간분포 계측의 공통된 실험조건으로서는 아스펙트 比(aspect ratio : R/L)를 2로 하였고, 아르곤 가스 유량은 5 [sccm]으로 안정하게 공급하였다. 아래에 그 실험결과에 대해서 기술한다.

그림 2에서 전자에너지 분포의 입력파워 의존성 계측에 사용된 동작압력은 30 [mTorr]이고, 측정 위치는 플라즈마 중심부($r=0, z=3$)이다. 여기에서 말하는 입력 파워는 RF 전원에서 입력하고 있는 파워이다. 전자에너지 분포는 파워가 증가할수록 높은 분포를 이루고, 500[W]에서 600[W]에서는 거의 일치하는 형태를 보인다. 이는 방전공간내에 파워가 증가 할 수록 전계의 강도가 강해지고, 전자가속이 빠르게 되어서 에너지를 많이 받는다고 생각 되어진다

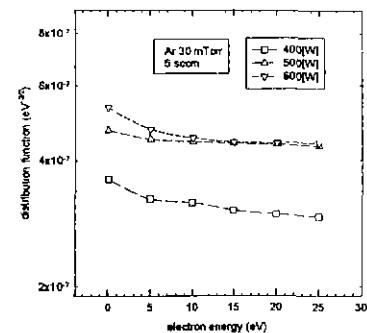


그림2 전자에너지 분포함수의 입력파워의존성

저압력 동작 유도결합 플라즈마원은 일반적으로 10^{-4} [Torr]에서 10^{-2} [Torr] 정도의 압력으로 동작시킨다. 이것은 ECR 플라즈마원 등에 비해서 비교적 높은 동작압력이다. RFICP 플라즈마원에서 어떤 동작압력이 질 좋은 가공을 할 수 있을까라고 하는 것에 대해서는 현재의 시점에서는 아직 토론의 여지가 있다. 본 실험에서는 전자에너지 분포의 압력 의존성을 10 [mTorr]에서 40 [mTorr]의 범위로, 측정의 위치는 플라즈마 중심부($r=0, z=3$)로 하였고, 입력 파워는 500 [W]로 하여 측정하였다. 그림 3에 그 측정결과를 나타내었다 전자에너지 분포도 압력이 증가할수록 높은 분포를 이루고, 특히 40 [mTorr]에서 온도의 영향으로 전자에너지 분포함수는 낮아지나 전자에너지는 증가함이 잘 나타난다.

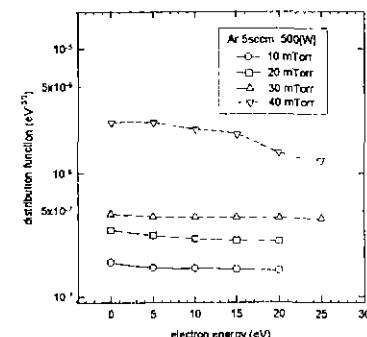


그림3 전자에너지 분포함수의 압력의존성

그림 4에서 나타낸 전자에너지 분포의 유량의존성의 계측 위치는 중심부($r=0, z=3$)이고 유량을 3[sccm]에서 12[sccm]까지 변화 시켰다. 전자에너지 분포는 유량이 증가할수록 높게 분포하고, 9[sccm]과 12[sccm]에서 중심분자의 증가에 따른 전자 충돌빈도의 증가로 이온화되면서 전자온도에 영향을 주어서 전자에너지 분포함수는 낮아지고, 전자에너지는 증가하는 것을 볼 수 있었다.

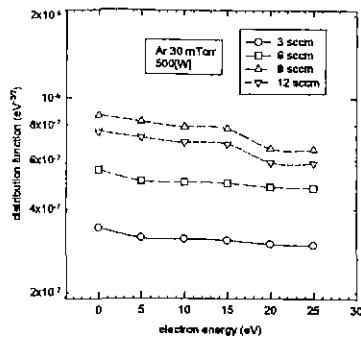


그림4 전자에너지 분포함수의 유량의존성

그림 5에 전자에너지 분포의 반경방향 공간분포의 측정 결과를 나타낸다. 그림에서 $r=0$ 측이 플라즈마 중심부이고, $r=8$ 측이 플라즈마 주변부이다. 전자에너지 분포는 중심부에서 높게 분포하고, 주변부로 갈수록 낮은 에너지를 가짐을 알 수 있다. 이는 플라즈마의 특징 중의 하나인 확산에 의해 주변부로 갈수록 고에너지자를 가진 기체분자수가 감소하기 때문이라고 생각 된다.

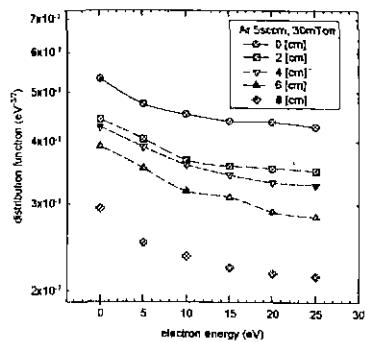


그림5 전자에너지 분포함수의 반경방향분포

그림 6에 전자온도 및 전자밀도의 축방향 공간분포의 측정결과를 나타낸다. 푸로우브의 반경방향 위치는 $r=0$. 즉 플라즈마 중심부에 두고, 석영창($z=0$)에서 기관($z=6$)까지 푸로우브의 위치를 변화시키면서, 플라즈마 각 파라메타의 축방향 공간분포를 측정하였다. 전자에너지 분포는 중심부 부근인 3[cm]에서 가장 높은 분포를 이루고, 주변부로 갈수록 감소하지만 석영창쪽의 위치인 1[cm]와 2[cm]가 5[cm]와 6[cm]보다 조금 높은 에너지 분포를 이루고 있음이 나타난다.

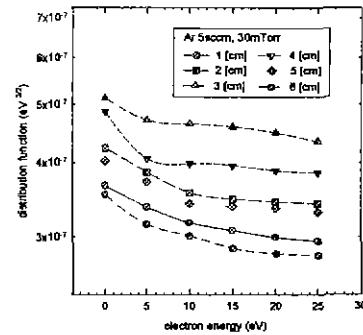


그림6 전자에너지 분포함수의 축방향분포

3. 결 론

- (1) 압력파워가 증가할수록 전자에너지 분포함수는 증가한다.
 - (2) 진공 내의 압력이 증가할수록 전자에너지 분포함수는 높은 분포를 이루다.
 - (3) Ar가스유량이 증가할수록 전자에너지 분포함수는 높게 분포하고, Ar가스유량이 9(sccm)과 12(sccm)에서 전자온도의 영향으로 전자에너지분포는 낮아지고, 전자에너지는 증가하는 것을 명확히 볼 수 있었다.
 - (4) 반경방향에 따른 전자에너지 분포함수는 중심부에서 주변부로 갈수록 감소 하였다.
 - (5) 축방향에 따른 전자에너지 분포함수는 중심에서 가장 높은 분포를 이루고, 주변부로 갈수록 감소 하였다.
- 이상의 결과에서 RFICP의 방전 매커니즘을 규명과, 간단한 모델에 비교에 응용될 수 있을 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 「Langmuir probe measurements of a radio frequency induction plasma」, J. Vac Sci. Technol. A11(1), pp.152, 1993
- [2] 「A tuned Langmuir probe for measurements in rf glow discharges」, J. Appl. Phys. 67(11), pp.6718 (1990)
- [3] 「Electron energy distribution in an rf discharge in neon」 Sov. Phys Tech Phys. 22(5) (1978)
- [4] 「Spatial evolution of electron-energy distribution in the vicinity of a discharge-tube constriction」 Phys Review A 38(4) pp.2044 (1988)