

Double Probe 측정법에 의한 RFI 플라즈마 특성에 관한 연구

(A Study on the Characteristics of Radio-Frequency Induction Coupled Plasma Using a double probe method)

전 용우*	영남대학교 대학원 전기공학과
하 장호	영남대학교 대학원 전기공학과
전 재일	영남대학교 산업기술대학원 전기전자공학과
박 원주	영남대학교 전기전자공학부
이 광식	영남대학교 전기전자공학부
이 등인	영남대학교 전기전자공학부

요 약

고주파 유도결합 플라즈마(RFICP)에서의 전자온도와 전자 밀도를 Double probe 측정법에 의해서 측정하였다. 사용가스는 아르곤가스를 사용하였으며 동작압력은 30 [mTorr]에서 60 [mTorr]로 하였고, 입력파워는 50 [W]에서 200 [W], 아르곤 가스유량은 3 [sccm]에서 12 [sccm]으로 하였다. 전자온도와 전자밀도의 반경방향의 공간분포는 아스펙트비(R/L)를 1로 하여 측정하였다. 전자온도는 입력파워에 대해서는 특별한 의존성이 없었으나 압력과 아르곤 가스유량에 대해서는 의존성이 있는 것으로 나타났다. 전자온도는 입력파워를 증가해도 거의 일정했고, 압력을 증가했을때는 감소하였고, 아르곤 가스유량을 증가하면 저유량에서 전자온도는 저하하려는 경향이 있으나 유량이 증가할수록 변화는 거의 차이가 없는 것으로 볼 수 있다. 전자밀도는 입력파워와 압력, 아르곤 가스유량에 대해서 모두 의존성을 가지는 것으로 나타났다. 전자밀도는 입력파워를 증가할수록 증가하였고 압력에 대해서는 거의 일정했고, 아르곤 가스유량에 대해서는 증가하는 것을 나타내었다. 반경방향의 공간분포 측정에서는 전자온도는 플라즈마 중심부에서 주변부로 갈수록 조금씩 상승하는 것을 볼 수 있으며 전자밀도는 플라즈마 중심부에서 가장 높은 밀도를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 고주파 유도결합 플라즈마(RFICP)에서의 생성유지기구들의 파악에 도움을 줄 수 있었다.

1. 서 론

최근, 반도체 산업에서의 플라즈마 프로세서의 이용이 점점 더 크게 되므로써, 웨이퍼의 미세화와 대면적화도 급속도로 진행되고있다. 그러므로, 저압력에서 보다 넓은 면적의 균등한 플라즈마를 생성할 수 있는 새로운 고효율 플라즈마원의 연구·개발이 필요하게 되었다.

새로운 고효율 플라즈마원은 1) 고밀도($>10^{10}$ [cm⁻³]) 플라즈마를 생성하는 것과, 2) 대구경(직경 > 0.2 [m])의 균일한 플라즈마를 생성, 3) 저압력($10^{-2} \sim 10^{-3}$ [Torr])에서 플라즈마를 생성하여야 하는데, 이러한 조건을 만족하는 플라즈마원으로서 지금까지 고안되고 연구되어왔던 플라즈마원은 전자 사이클로트론 공명(ECR) 플라즈마와 헬리콘과 플라즈마(HWP), 그리고 최근에 연구되어지고 있는 유도결합 플라

즈마(ICP)^{[1]-[5]} 등이 있다.

고주파 유도결합 플라즈마(RFICP)원은 지금까지 널리 사용되어 왔던 용량결합형 플라즈마(CCP)원과 비교하여^[6] 1) 동작압력이 비교적 낮은 반면, 2) 높은 플라즈마 밀도를 가지고, 3) 플라즈마를 생성하는 진공관 내에 방전용의 전극을 갖지 않으므로, 전극의 스퍼터링 현상 등에 의한 플라즈마 중으로의 불순물의 혼입이 작다. 4) 그리고, ECR 이나 HWP와 비교하여 작동원리에서 강력한 외부 자장을 이용하지 않으므로, 플라즈마 균일도와 플라즈마 면적을 증가시키는 것이 용이하고, 5) 장치적인 구조에 제약이 작다. 6) 그리고, 기관 바로 위에서 플라즈마가 형성되므로 플라즈마를 직접 반응에 사용할 수 있는 장점을 가지므로, 차세대 프로세서용 플라즈마의 장치로서 유망하다고 생각할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 향후 행하여지게 될 플라즈마 프로세서의 효율화, 최적화를 도모하기 위해서, 우선 RFICP 원을 직접 설계·제작하고, 방전메카니즘을 체계적으로 이해하기 위하여 전자온도, 전자밀도를 Double probe법^{[6]-[9]}을 이용하여 측정하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

그림1에 본 실험에 사용한 고주파 유도결합 플라즈마 발생 장치를 나타낸다. 진공관은 길이 400 [mm], 직경 300 [mm]의 스테인레스 스틸제로 설계·제작하였고, 푸로브 측정법에 적당한 구조로 되어있다. 진공관 내부에는 박막 가공을 할 때 시료를 고정하는 웨이퍼 홀더(wafer holder)가 있으며, 기관은 상하로 움직일 수 있도록 하였다. 그리고, 진공관 상부에는 안테나 코일을 설치하기 위하여 직경 280 [mm], 두께 2.5 [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.

플라즈마의 발생방법으로서는 로터리 펌프와 터보분자 펌프를 사용하여, 진공관 내부를 1.0×10^{-6} [Torr] 까지 배기한 후, 유량조절기와 니들 밸브(needle valve)를 사용하여 일정 유량의 고순도 아르곤 가스(순도 99.999 [%])를 진공관 내로 유입한다. 그 후, 콘트롤 밸브(control valve)로써 진공관 내

의 압력을 원하는 값(10^{-2} ~ 10^{-3} [Torr])에 일정하게 유지한다. 진공관내 가스압력은 피라니 게이지(Pyran Gauge)와 바라트론 게이지(Baratron Gauge)로서 측정하였다. 그리고, 고주파 전원을 매칭박스를 통해 안테나 코일에 인가하여 플라즈마를 발생시킨다. 이 때에 반사전력은 0으로 되는 것을 확인하고, 반사가 있는 경우에도 입사전력의 5 [%] 이내가 되도록 매칭 박스를 조정하였다.

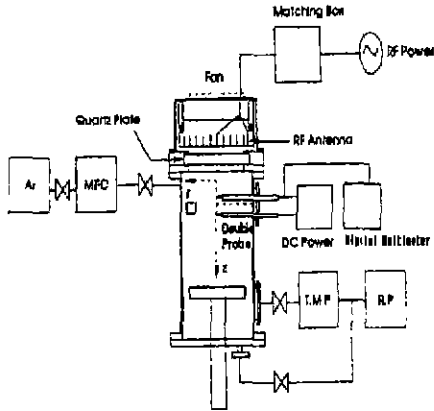


그림 1. 고주파 유도결합 플라즈마 발생장치 개략도

측정에 있어서는 직경 0.5 [mm], 길이 3 [mm]의 텅스텐 선으로 된 프로브에 ± 100 [V]의 직류가변전원을 인가하여, 프로브 전압에 따른 프로브 전류를 디지털 멀티미터(Keithley 2000 Multimeter)로서 측정하였다. 그림2는 Double Probe 측정법의 측정회로도를 나타낸다. 그림과 같이 플라즈마중에 같은 형상의 프로브 2개를 삽입하여 그 때 프로브에 흐르는 전류값을 측정하여 전자온도와 전자밀도를 구할수 있다. 각 프로브간의 간격은 프로브 쌍방의 시스템에 이상인 18.7mm로 하였다.^[8]

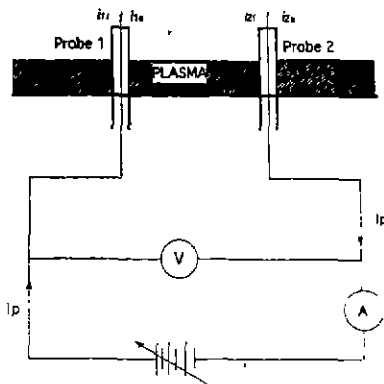


그림 2. 측정회로도

3. 실험결과 및 고찰

전자온도, 전자밀도의 입력파워 의존성과 동작압력 의존성, 반경방향 공간분포의 공통된 실험조건으로서는 아스펙트 비[aspect ratio : R(플라즈마의 반경)/L(석영창에서 기판까지의 거리)]를 1로 하였고, 아르곤 가스 유량은 5 [sccm]으로 안정하게 공급하였다. 그리고, Ar 가스유량 의존성은 30 [mTorr], 200 [W]에서 실험을 행하였다.

전자온도와 전자밀도의 입력파워 의존성 측정에 사용된 동작압력은 30 [mTorr]이고, 측정 위치는 플라즈마 중심부($r=0$)이다.

그림3에 입력파워를 50 [W]에서 200 [W]까지 변화시켰을 때의 전자온도의 측정결과를 그림4에 전자밀도의 측정결과를 나타내었다. 전자온도는 입력파워에 대해서 특별한 의존성을 보이지 않고 있으며 이는 입력을 보다 증가시켜도 안정성을 가진다는 것으로 추정된다. 전자밀도는 입력파워를 증가시킬수록 증가함을 나타내고 있다. 이는 입력파워를 증가할수록 전계가속에 의한 충돌이 많아지기 때문이라고 생각된다.

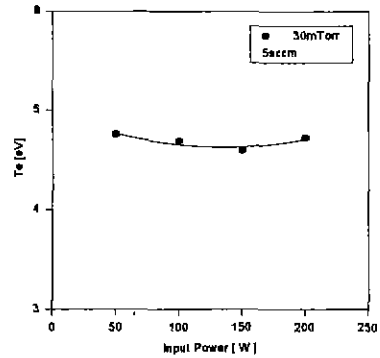


그림 3. 전자온도의 입력파워 의존성

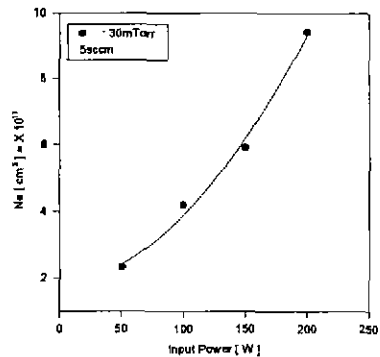


그림 4. 전자밀도의 입력파워 의존성

동작압력을 30 [mTorr]에서 60 [mTorr]의 범위로 변화시키며 플라즈마 파라메타의 압력 의존성을 계속하였다. 측정의

위치는 플라즈마 중심부($r=0, z=3$)로 하였고, 입력 파워는 200 [W]로 하였다.

그림5에 전자온도의 압력의존성을 그림6에 전자밀도의 압력의존성을 나타내었다. 전자온도는 압력이 증가함에 따라서 그 값이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 압력이 증가하면 중성기체분자 수가 증가하기 때문에 플라즈마 밀도가 높아지고, 따라서 충돌빈도가 증가하므로 전자온도가 낮아지는 것으로 생각되어진다. 전자밀도의 압력의존성은 압력이 증가함에 따라서 전자밀도는 증가하는 것을 보이고 있다.

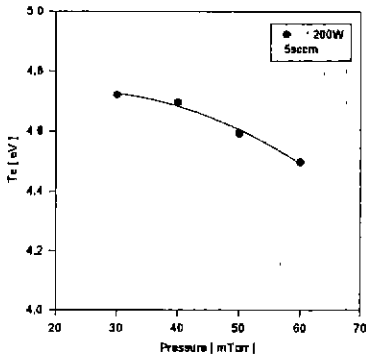


그림 5. 전자온도의 압력 의존성

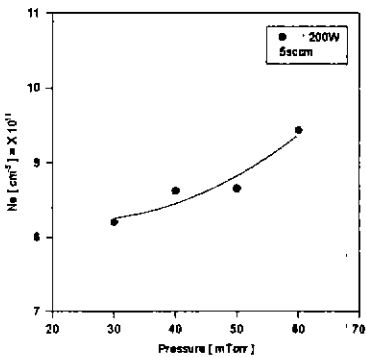


그림 6. 전자밀도의 압력 의존성

진동과 회전으로 인하여 탄성충돌이 증대되어^[6] 전리 및 여기현상이 감소되며, 그결과 가스분자의 밀도가 커지는 것으로 추정되며, 이로 인하여 전자온도가 감소되는 것으로 생각된다. 전자밀도는 가스 유량이 증가함에 따라 그 값이 증가함을 볼 수 있었고, 또한 각각의 가스 유량에서 입력파워가 증가함에 따라서도 그 값이 증가함을 볼 수 있었다. 이는 동일한 동작 가스압력에서 가스 유량과 입력파워를 조절함으로써 플라즈마 전자밀도를 조절할 수 있음을 보여준다고 할 수 있다.

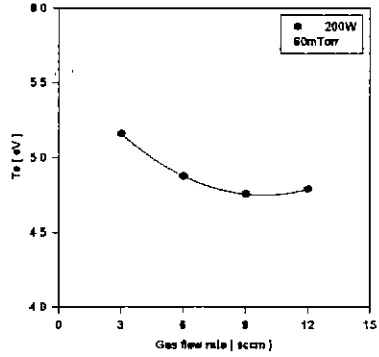


그림 7. 전자온도의 가스유량 의존성

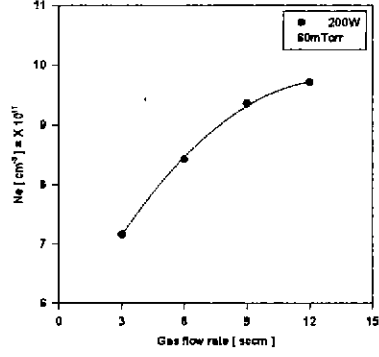


그림 8. 전자밀도의 가스유량 의존성

그림7과 그림8은 아스펙트 비[RL]가 1이고, 동작압력 30 [mTorr], 입력파워 200 [W]로 하여 실험한 전자온도와 전자밀도의 아르곤 가스유량 의존성을 나타낸 것이다. 가스유량은 3-12[sccm]으로 변화시켰을때, 전자온도는 저유량에서는 저하하려는 경향이 있으나 유량이 증가할수록 그 값의 변화는 거의 차이가 없는 것으로 볼 수 있다. 유량증가에 따라 전자온도가 감소하는 경향은 중성가스분자의 질량과 전자의 질량에 큰 차이가 있으므로 전자는 전계에 의해 가속되나, 중성가스분자는 유량에 의한 분자의

푸로브를 진공관에 수평방향으로 삽입하여 플라즈마 반경 방향으로 그 위치를 변화시켜 가면서, 플라즈마 각 파라메타의 공간분포를 측정하였다. 플라즈마의 반경방향의 크기는 석영창의 크기가 직경 280 [mm] 이므로 R=140 [mm] 까지이다. 이 실험의 조건으로서 압력은 30 [mTorr], 입력파워는 200 [W], 아르곤 가스유량은 5 [sccm]으로 일정하게 공급하였다.

그림9에 전자온도의 반경방향의 공간분포를 그림10에 전자밀도의 반경방향 공간분포의 측정결과를 나타내었다. 그림에서 $r=0$ 축이 플라즈마 중심부이고, $r=14$ 축이 플라즈마 주

변부이다. 전자온도의 반경방향 공간분포는 플라즈마 중심에서 주변부로 갈수록(0-12cm) 그 온도는 조금씩 증가하는 것을 보이고 있다. 이것은 진공관내 구조에 따른 압력차이에서 기인하는 것으로서 챔버 외벽 부근에서의 압력이 챔버중심부에서 보다 낮음에 따른 영향으로 생각되어진다. 전자밀도의 반경방향 공간분포는 플라즈마 중심부에서 플라즈마 주변부로 갈수록 그 값이 감소함을 볼 수 있다. 이 또한 플라즈마 주변부로 갈수록 압력이 낮아짐에 기인한다.

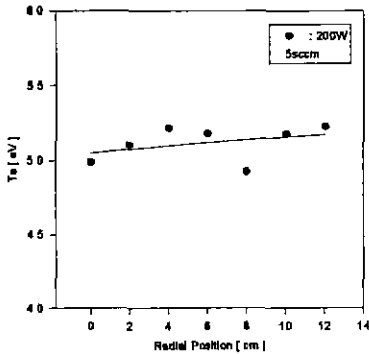


그림 9. 전자온도의 반경방향 공간분포

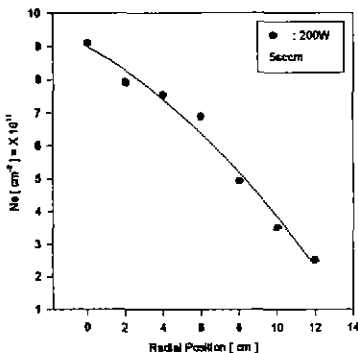


그림 10. 전자밀도의 반경방향 공간분포

4. 결 론

본 연구에서는, 고주파 유도결합 플라즈마원의 장치를 직접 설계·제작하여, 플라즈마 제어 파라메타에 따른 각각의 전자온도와 전자밀도를 Double probe법을 이용하여 측정하였다. 이하에 실험에서 얻어진 결과를 나타낸다.

(1) 전자온도의 입력파위에 대한 의존성은 볼 수 없지만, 전자밀도는 입력 파위가 증가할수록 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

(2) 동작 가스압력에 따른 전자온도는 압력이 낮을수록 높

은 값을 가지고, 전자밀도는 압력이 증가함에 따라 그 값이 증가하였다.

(3) 전자온도의 아르곤 가스유량에 대한 의존성은 저유량에서는 그 값이 감소하나 유량이 증가할수록 값의 차이는 거의 없었고, 전자밀도는 가스유량이 증가함에 따라 그 값이 증가함을 볼 수 있었다.

(4) 전자온도의 반경방향 공간분포는 거의 플랫폼하지만, 플라즈마 주변부에서 약간 상승함을 볼 수 있었고, 전자밀도의 반경방향 공간분포는 플라즈마 중심부에서 주변부로 갈수록 감소함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Hopwood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair and J. J. Cuomo, "Langmuir probe measurements of a radio frequency induction plasma", J. Vac. Sci. Technol, A11(1), pp.152, 1993
- [2] J. H. Keller, J. C. Foster and M. S. Barnes, "Novel radio-frequency induction plasma processing techniques", J. Vac. Sci. Technol, A11(5), pp.2487, 1993
- [3] 菅井秀郎, "低壓力・高密度 プラズ마の新しい 展開", 應用物理, 63권 6호, pp.559, 1994
- [4] 박성근, 박상운, 박원주, 이광식, 이동인 "고주파 유도방전 플라즈마 특성에 관한 연구(II)" 대한전기학회 방전 및 고전압 연구회 97 춘계학술연구 발표회 논문집, 1997년5월
- [5] J. Amorim, H. S. Maciel and J. P. Sudano, "High-density plasma mode of an inductively coupled radio frequency discharge", J. Vac. Sci. Technol, B. 9(2), pp.362, 1991
- [6] 柴井信力, 플라즈마基礎工學, 内田老鶴園, 1995
- [7] S. Kosima and K. Tajayama, J. Phys. Soc, Japan, 4, 349 (1949)
- [8] E. O. Johnson and L. Malter, Phys. Rev, 80, 58(1950)
- [9] 이덕출, 김영일, 김동화, 박상현, "Measurement of Electron Temperature in a Glow Discharge with a Double Probe Method", 전기학회 논문집 제32권 제4호 1983년 4월