

고주파 유도방전 플라즈마 특성에 관한 연구

(A study on the Characteristics of the Radio-Frequency Induction Discharge Plasma)

박 원주*

(Won-Zoo Park)

요 약

본 연구에서는 랑그뮤어 푸로브법을 이용하여 고주파 유도결합 플라즈마에서 전자온도와 전자밀도를 측정하였다. 실험의 공통조건은 압력 10~40[mTorr], 입력파워는 100~600[W]이고, 공간분포 측정에서의 아스펙트비(R/L)는 2로 하였다. 전자온도와 전자밀도의 의존성을 측정한 결과 입력파워에서는 전자온도는 약간증가하는 경향을 보이고 있지만, 전자밀도는 입력파워가 100~250[W]까지는 증가율이 완만하고 450[W]에서 포화되는 것을 알 수 있었다. 압력에 대한 의존성은 압력이 낮을수록 높은 값을 나타내고, 전자밀도에서는 압력이 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다. 전자온도의 반경방향의 공간분포는 석영창 부근에서 기판 쪽으로 갈수록 감소되는 경향이 있다. 전자밀도에서는 플라즈마 중심부에서 석영창 쪽으로 약간 이동한 위치에서 피크의 값을 가지고, 석영창과 기판쪽에서는 그 값이 감소함을 볼 수 있었다. 전자온도의 축방향의 공간분포는 석영창 부근에서 기판 쪽으로 갈수록 감소되는 경향이 있다. 또, 전자밀도는 플라즈마 중심부에서 석영창 쪽으로 약간 이동한 위치에서 피크의 값을 가지고, 석영창과 기판쪽에서는 그 값이 감소함을 볼 수 있었다. 이상의 결과들은 유도방전플라즈마의 메카니즘의 체계적인 이해에 기여할 수 있을 것이다.

Abstract

Electron temperature and electron density were measured in a radio-frequency inductively coupled plasma (RFICP) using a Langmuir probe method. Measurement was conducted in an argon discharge for pressures from 10 mTorr to 40 mTorr and input rf power from 100 W to 600 W. Spatial distribution electron temperature and electron density were measured for discharge with same aspect ratio (R/L=2). Electron temperature and electron density were discovered depending on both pressure and power. Electron density was increased with increasing input power, but saturated at 450 W. Electron density was increased with increasing pressure. Radial distribution of the electron density was peaked at the position which was a little moved from center toward quartz window. Normal distribution of the electron density was peaked in the center between quartz plate and substrate. The above results could contribute to understand the Mechanism of Radio-Frequency Inductively Discharge Plasma.

* 정회원 : 영남대학교 공과대학 전기전자공학부 부교수 · 공학박사
접수일자 : 1999년 3월 4일

1. 서 론

1970년대 초기, 처음으로 플라즈마가 디바이스(device) 제조에 사용된 이후, 플라즈마를 이용한 디포지션(deposition) 및 에칭(etching) 기술은 반도체 제조 등 미세가공 분야에 사용되는 것으로 급속히 발전하였다. 특히 반도체 생산에 있어서는 여러 가지 재료를 보다 높은 안정성과 향상된 집적도를 갖도록 초미세한 형태로 가공할 필요가 있고, 동시에 생산성 향상을 위한 대형화도 필요로 한다. 플라즈마 프로세서는 현재로서는 이와 같은 요구에 응할 수 있는 유용한 기술로서, 산업발전을 위해서 없어서는 안되는 기술이다.

최근, 플라즈마 프로세서(Plasma Process)에 대한 요구는 점점 더 크게 되었고, 이러한 요구들중에서 미세화와 대면적화가 급속도로 진행됨으로써 저압력에서 보다 넓은 면적의 균등한 플라즈마를 생성할 수 있는 새로운 고효율 플라즈마원(Plasma Source)의 연구개발이 필요하게 되었다. 이러한 요구에 따라 지금까지 고안되고 연구되어 왔던 플라즈마원으로서 전자 사이클로트론 공명(ECR) 플라즈마[1], 헬리콘과 플라즈마(HWP)[2], 그리고 최근에 연구되어지고 있는 저압 동작 유도결합 플라즈마(ICP)[3~5] 등이 있다. 이들의 플라즈마원은 1)고밀도(10^{12} [cm⁻³]이상) 플라즈마를 생성하는 것과, 2)대구경(직경 > 0.2 [m])의 균일한 플라즈마를 생성, 3)저압력($10^{-2} \sim 10^{-3}$ [Torr])에서 플라즈마를 생성하는 공통된 특징을 가진다.

고주파 유도결합 플라즈마(RFICP)원은 고주파 전류가 방전 가스 중에서 시간변화하는 자장을 만들어 내고, 시간에 변화하는 자장이 전기장을 생성하여 플라즈마를 생성·유지하게 되는 것으로[6~10] 지금까지 널리 사용되어 왔던 용량결합형 플라즈마(CCP)원과 비교하여^[11] 1) 동작압력이 비교적 낮은 반면, 2) 높은 플라즈마 밀도를 가지고, 3) 플라즈마를 생성하는 진공용기 내에 방전용의 전극을 갖지 않으므로, 플라즈마중으로 전극의 스퍼터링(sputtering) 현상 등에 의한 불순물의 혼입이 작다. 4) 그리고, ECR 이나 HWP 플라즈마원과 비교하여 작동원리에서 강력한 외부 자장을 이용하지 않으므로,^{[7]~[10]} 플라즈마 균일도와 플라즈마 면적을 증가시키는 것이 용이하고, 5) 장치적인 구조에 제약이 작다. 6) 그리고, 기판

(substrate) 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 고주파 유도결합 플라즈마원을 직접 설계·제작하여, 플라즈마의 기초특성, 즉 전자온도, 전자밀도의 플라즈마 파라메타(Plasma Parameters)를 계측하여, 방전의 메카니즘을 체계적으로 이해하고자 하였다. 계측방법에는 레이저 유기형광(LIF)분광법[12, 13] 톨슨산란법, 푸로브법 등 여러가지 방법이 있지만, 본 실험에서는 랑그뮤어 푸로브법[14~16]을 이용하여 플라즈마 파라메타의 입력파워 의존성과 압력 의존성, 그리고 변경방향 및 축방향 공간분포의 계측을 행하였다.

2. 측정값과 그 평가

그림 1에 푸로브의 전류-전압 특성 곡선을 나타내었다. 푸로브 전류는 이온전류와 전자전류로 분리할 수 있는데, 그림 1에서 알 수 있듯이 푸로브전압 V_p 에서 음의 부분인 이온전류의 값이 수 [μ A] 인데 반해, 푸로브전압 V_p 에서 양의 부분인 전자전류는 수 십에서 수 백 [mA] 이므로, 이온전류를 무시하고 푸로브 전류를 전자전류로 대체할 수 있다.^[14]

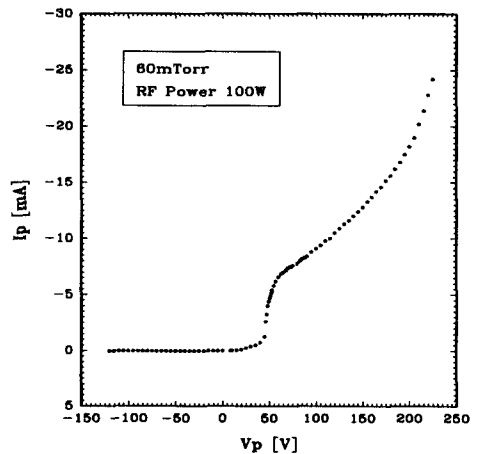


그림 1. 푸로브의 전류-전압 특성 곡선
Fig. 1. Current-Voltage characteristic curve of a probe

고주파 유도방전 플라즈마 특성에 관한 연구

푸로브 전류를 전자전류로 대체하여 반대수 그래프로 나타낸 전자전류의 특성곡선에서 직선적으로 증가하는 부분의 기울기로 전자온도 T_e 를 구하였고, 이를 다음식에 대입하여 전자밀도 N_e 를 구하였다 [14].

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

3. 실험장치 및 측정방법

본 실험에 사용한 고주파 유도결합 플라즈마 발생장치의 개략도를 그림 2에 나타낸다.

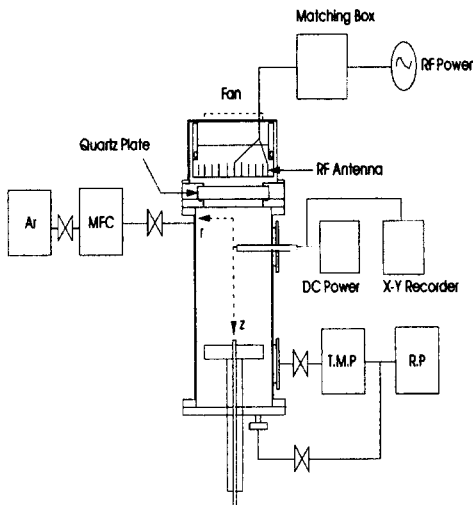


그림 2. 플라즈마 발생장치 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of Plasma Generation device

플라즈마 발생장치의 기본구성은 크게 나누어, 1) 고주파를 발생시키는 고주파 전원과 플라즈마 및 부하 임피던스와의 매칭을 위한 매칭박스(Matching Box), 2)방전을 일으켜 플라즈마를 생성하는 진공용기, 3)가스용기와 유량 조절기(Mass Flow Controller : MFC)로 구성되어 진공용기에 사용가스를 공급하는 가스부, 4) 로터리 펌프(Rotary Pump : RP)와 터보분자 펌프(Turbo Molecular Pump : TMP)등의 배

기부로 이루어진다.

진공용기는 길이 400 [mm], 직경 300 [mm]의 스테인레스 스틸제로 설계·제작하였고, 플라즈마 계측에서 푸로브 측정법을 이용하기에 적당한 구조로 되어 있다. 진공용기 내부에는 박막 가공을 행할 때 시료를 고정하는 웨이퍼 홀더(wafer holder)가 있으며, 기관은 상하로 움직일 수 있도록 하였다. 그리고, 진공용기 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 진공용기와 가까운 위치로 테프론을 사용한 내열동축케이블에 의하여 매칭박스를 사이에 두고 안테나 코일에 보내어 진다. 안테나 코일 상부에는 코일과 케이블의 냉각을 위하여 강제공냉팬을 설치하였다.

플라즈마의 발생방법으로서 로터리 펌프와 터보분자 펌프를 사용하여, 진공용기 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 진공용기 내로 유입한다. 그 후, 콘트롤 밸브(control valve)로써 진공용기 내의 압력을 원하는 값($10^{-2} \sim 10^{-3}$ [Torr])에 일정하게 유지한다. 진공용기내 가스압력은 피라니게이지(Pirani Gauge)와 바라트론 게이지(Baratron Gauge)로서 측정하였다. 그리고, 고주파 전원을 매칭박스를 통해 안테나 코일에 인가하여 플라즈마를 발생시킨다. 이 때에 반사전력은 0이 되는 것을 확인하고, 반사가 있는 경우에도 입사전력의 5 [%] 이내가 되도록 매칭박스를 조정하였다.

측정에 있어서는 직경 0.5 [mm], 길이 3 [mm]의 텅스텐 선으로 된 푸로브에 ± 200 [V]의 직류가변 전원을 인가하여, 푸로브 전압 V_p 에 따른 푸로브 전류 I_p 를 X-Y 레코드로써 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

전자온도, 전자밀도의 입력파워 의존성과 가스압력 의존성, 반경방향 공간분포 및 축방향 공간분포

계측의 공통된 실험조건으로는 aspect ratio(R/L)를 2로 하였고, 아르곤 가스 유량은 5 [sccm]으로 일정하게 공급하였다. 전자온도와 전자밀도의 입력파워 의존성 계측에 사용된 동작압력은 30 [mTorr]이고, 측정 위치는 플라즈마 중심(r=0, z=3)이다. 여기에서 말하는 입력 파워는 RF 전원에서 입력하고 있는 파워이고, 모두가 플라즈마에 흡수되어지고 있는 것은 아니다. 플라즈마로 흡수되고 있지 않은 파워의 대부분은 케이블에서 소비되고 있다고 생각할 수 있다.

입력파워를 100 [W]에서 600 [W]까지 변화시켰을 때의 전자온도 및 전자밀도의 측정결과를 그림 3에 나타낸다.

그림 3에서 보는 바와 같이 입력파워가 증가함에 따라서 전자온도는 약간 증가하는 경향을 보이고 있지만, 전자밀도는 입력파워가 100[W]~250[W] 정도까지는 증가율이 완만하다가 250[W]~450[W]에서는 급격히 증가하였고, 450[W]부근에서 부터는 포화하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 입력파워가 증가할수록 입자들의 충돌빈도가 높아지는 것에 기인하기 때문이라고 생각된다. 또한 이것으로부터 화학적 반응이 추가 되는 에칭 공정에서 입력파워를 조절함으로써 플라즈마 전자밀도를 조절할 수 있고, 따라서 에칭율(etching rate)을 조절할 수 있다는 것을 보여준다.

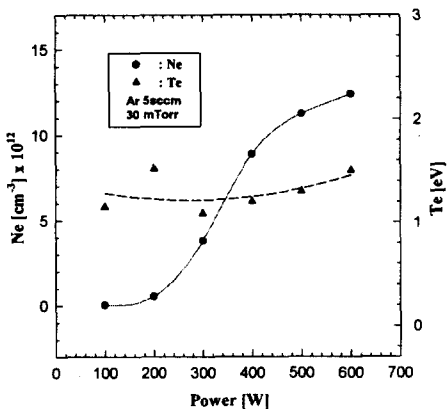


그림 3. 전자온도 및 전자밀도의 입력파워 의존성
Fig. 3. The input RF power dependence of electron temperature and electron density

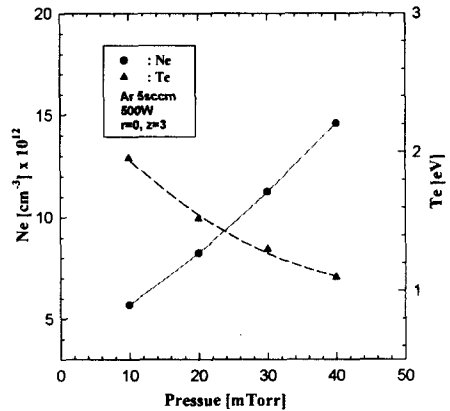


그림 4. 전자온도 및 전자밀도의 압력 의존성
Fig. 4. Pressure dependence of electron temperature and electron density

그림 4는 전자온도 및 전자밀도의 압력 의존성을 나타낸다. 10 [mTorr]에서 40 [mTorr]의 압력범위에서, 측정의 위치는 플라즈마 중심(r=0, z=3)로 하였고, 입력 파워는 500[W]로 일정하게하여 측정하였다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 전자온도는 저압력에서 높은 값을 나타내었다. 이것은 압력이 낮아지면 중성기체분자의 수가 감소하기 때문에 플라즈마 밀도가 낮아지고, 따라서 충돌빈도가 낮아지므로, 전자의 온도가 높아지는 것으로 생각된다. 전자밀도는 압력이 증가함에 따라 그 값이 증가하였다.

그림 5는 전자온도와 전자밀도의 반경방향 공간분포의 측정결과를 나타낸다. 그림에서 r=0 축이 플라즈마 중심부이고, r=14 축이 플라즈마 주변부이다. 푸로브를 진공용기에 수평방향으로 삽입하여 플라즈마 반경방향으로 그 위치를 변화시켜 가면서, 플라즈마 각 파라메타의 공간분포를 측정하였다. 플라즈마의 반경방향의 크기는 석영창의 크기가 직경 280[mm]이므로 R=140[mm]까지이다. 이 실험의 조건으로는 압력은 30 [mTorr], 입력파워는 600 [W]이며, 측방향의 측정위치치는 L/2(L은 석영창에서 기관까지의 거리), 즉 석영창에서 35 [mm] 떨어진 플라즈마 중심단면이다

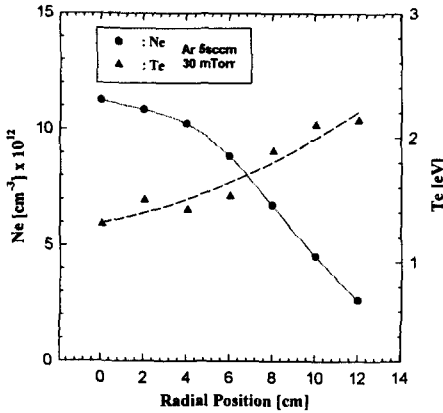


그림 5. 전자온도 및 전자밀도의 반경방향 공간분포
Fig. 5. Radial distribution of electron temperature and electron density

그림 5에서 보는 바와 같이 전자온도의 반경방향의 공간분포는 플라즈마 중심에서 6[cm]까지는 완만하게 증가하다가 6[cm]이상 부터는 급격히 증가되어지고 있다. 또, 전자밀도의 반경방향 공간분포는 플라즈마 중심에서 4[cm]까지는 완만하게 감소하다가 4[cm]이상의 가장자리로 가면서 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 유도결합형 플라즈마의 리액터 구조상 중심에서 전계의 세기가 강하고, 주변부로 갈수록 전계의 세기가 약해진다는 것과 플라즈마의 확산 특성 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다.

그림 6에 전자온도 및 전자밀도의 축방향 공간분포의 측정 결과를 나타낸다. 푸로브의 반경방향 위치는 $r=0$, 즉 플라즈마 중심부에 두고, 석영창($z=0$)에서 기판($z=7$) 부근까지 푸로브의 위치를 변화시키면서, 플라즈마 각 파라메타의 축방향 공간분포를 측정하였다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 전자온도는 석영창 부근에서 기판 쪽으로 갈수록 감소되는 경향이 있다. 또, 전자밀도는 플라즈마 중심부에서 석영창 쪽으로 약간 이동한 위치에서 피크의 값을 가지고, 석영창과 기판쪽에서는 그 값이 감소함을 볼 수 있었다. 이것은 안테나 코일에서 발생하는 자장이 플라즈마 층으로 침투할 수 있는 깊이는 표피두께(skin depth) 정도이므로, 입력파워가 전달되는 영역이 석영창으로부터 표피두께 이내로 한정되어, 활성화된 전자들이 전극주위에 더 많이 분포된다.

따라서 전자밀도의 최대가 되는 위치가 플라즈마 중심부에서 석영창 쪽으로 약간 이동하는 것으로 생각된다.

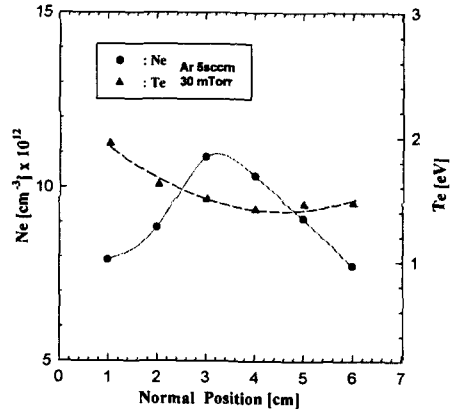


그림 6. 전자온도 및 전자밀도의 축방향 공간분포
Fig. 6. Normal distribution of electron temperature and electron density

5. 결 론

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

(1) 전자온도는 입력파워가 증가함에 따라서 약간 증가하는 경향을 보이고 있지만, 전자밀도는 입력파워가 100[W]~250[W] 정도 까지는 증가율이 완만하다가 250[W]~450[W]에서는 급격히 증가하였고 450[W]부근에서 부터는 포화하는 경향을 볼 수 있었다.

(2) 동작 가스압력에 따른 전자온도는 압력이 낮을수록 높은 값을 가지고, 전자밀도는 압력이 증가함에 따라 그 값이 증가하였다.

(3) 전자온도의 반경방향의 공간분포는 플라즈마 중심에서 6[cm]까지는 완만하게 증가하다가 6[cm]이상 부터는 급격히 증가되어지고 있다. 또, 전자밀도의 반경방향 공간분포는 플라즈마 중심에서 4[cm]까지는 완만하게 감소하다가 4[cm]이상의 가장자리로 가면서 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다.

(4) 전자온도의 축방향 공간분포는 석영창 부근에서 기관 쪽으로 갈수록 감소되는 경향이 있다. 또, 전자밀도는 플라즈마 중심부에서 석영창 쪽으로 약간 이동한 위치에서 피크의 값을 가지고, 석영창과 기관쪽에서는 그 값이 감소함을 볼수 있었다.

이상의 결론에서 RFICP 플라즈마의 생성기구를 파악할 수 있었다. 이는 대구경 프로세스용 플라즈마 원으로써 설계·제작·운전함에 있어서 응용할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 금후에는 좀더 균일한 플라즈마 밀도분포를 위한 플라즈마 가둠장치가 필요할 것으로 생각되며, 이 RFICP 플라즈마의 전자에너지 분포와 중성입자 등을 계측하므로써 더욱 깊이 있게 이해할 필요가 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 전력기술 기초연구(과제관리번호 : 95-65) 지원에 의하여 수행하였음.

참 고 문 헌

[1] Jes Asmussen, "Electron Cyclotron Resonance Microwave discharges for etching and thin-film deposition", J. Vac. Sci. Technol, A7(3), p.883, 1989

[2] K. Suzuki, K. Ninomiya, "Radio-frequency biased microwave plasma etching technique", J. Vac. Sci. Technol, B3(4), p.1025, 1985

[3] 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), p.152, 1993

[4] J. H. Keller, J. C. Foster and M. S. Barnes, "Novel radio-frequency induction plasma processing techniques", J. Vac. Sci. Technol, A11(5), p.2487, 1993

[5] 菅井秀郎, "低壓力・高密度 プラズ마의新しい 展開", 應用物理, 63권 6호, p.559, 1994

[6] J. Hopwood, C. R. Guarnieri, S. S. Whitehair, "Electromagnetic fields in a radio-frequency induction plasma", J. Vac. Sci. Technol, A11(1), p.147, 1993

[7] Michael A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", JOHN WILEY & SONS, 1994

[8] Brian Chapman, "Glow Discharge Processes", JOHN WILEY & SONS, 1980

[9] Maurice H. Francombe, John L. Vossen, "Physics of Thin Films : Plasma Sources for Thin Film Deposition and Etching", Academic Press, 1994

[10] J Reece Roth, "Industrial Plasma Engineering : Volume 1", Institute of Physics, 1995

[11] 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), p.362, 1991

[12] W. Z. Park, T. Equchi, C. Honda, K. Muraoka, Y. Yamagata, "Investigation of the thermalization of sputtered atoms in a magnetron discharge using laser-induced fluorescence", Appl. Phys. Lett, 58(22), p.2564, 1991

[13] W. Z. Park, M. Tanigawa, T. Kajiwara, K. Muraoka, M. Masuda, T. Okada, "Effect of Laser-Induced Dissociation during Measurements of Hydrogen Atoms in Silane Plasma Using Two-Photon-Excited Laser-Induced Fluorescence", Jpn. J. Appl. Phys, 31(9A), p.2917, 1992

[14] 堤井信力, プラズマ基礎工學, 内田老鶴園, 1995

[15] プラズマ・核融合學會, "プラズマ診断の基礎", 名古屋大學出版會, 1990

[16] B. E. Cherrington, "The Use of Electrostatic Probes for Plasma Diagnostics - A Review", Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2(2), p.113, 1982

◇ 저자소개 ◇

박 원 주 (朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 일본 큐우슈우대학교 대학원 졸업(박사) 현재 영남대 공대 전기전자공학부 부교수. 당화희 대구·경북지회 연구조사이사