

A Study on the Relationships between Plasma Parameters and Magnetic Field

金斗煥* · 張允碩** · 曹井守*** · 朴正后***
(Doo-Hwan Kim · Yun-Seok Jang · Jung-Soo Cho · Chung-Hoo Park)

Abstract - It is well known that the understanding of the complex mechanism of magnetoplasma is closely related with understanding of the collective behavior of discharge plasma parameters such as the cathode-sheath potential, cathode-sheath thickness, electron temperature, electron density, and ambipolar diffusion. In this paper, some of the relationships between these plasma parameters and magnetic field is investigated experimentally with a Langmuir probe in the magnetoplasma generated by D.C diode system. It is found that when magnetic field is increased, cathode-sheath potential, cathode-sheath thickness, and ambipolar diffusion are decreased. In addition, peak ion density obtained as a parameter of ionic signal voltage by Faraday cup method is independent of magnetic field

Key Words : Discharge Plasma, Cathode-sheath, Peak Ion Density, Equivalent Gas Pressure

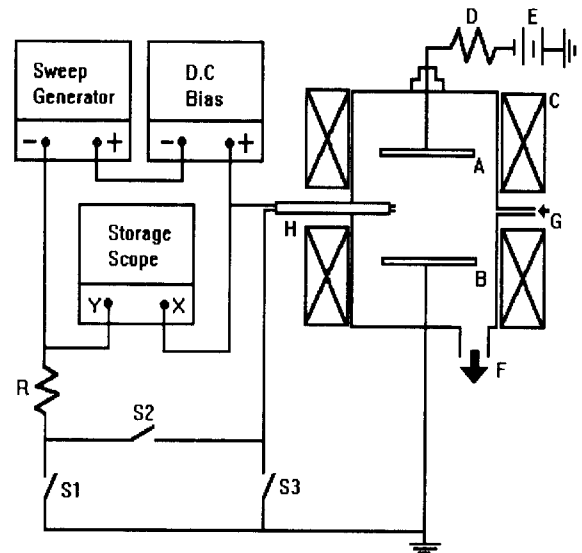
1. 서론

최근, 각종 플라즈마들은 박막 디바이스(thin-film devices) 제작 및 신소재를 개발하는데 이용되고 있다[1]. 그러나, 방전 플라즈마의 복잡한 메카니즘으로 인해 플라즈마 프로세서를 설계하는데 어려움이 있으며, 그 중에서도 방전 플라즈마의 음극의 시스 두께, 전자온도, 전자밀도등의 플라즈마 파라메타들이 상호연관성을 가지고 있음으로 플라즈마의 특성 해석에도 많은 어려움이 따른다[1]. 더욱이, 플라즈마 프로세서에서는 고밀도 플라즈마를 형성할 목적으로 자화 플라즈마를 이용하기 때문에 방전 플라즈마의 파라메타들을 해석하기에는 더욱 어려워진다.

본 논문에서는 평행 평판형 전극간에 직류전압 및 자계를 인가하여 얻어진 아르곤 자화 플라즈마에서 자계를 변화시켰을 경우, 자화 플라즈마의 전리율에 영향을 미치는 음극의 시스 전위와 음극 시스 두께 변화를 Langmuir 푸르브를 이용하여 고찰하였다. 한편, 2 전류법[2]을 이용하여 양극성 확산과 음극 시스 두께와의 상관관계를 고찰하였으며, 페러데이 컵(Faraday cup)을 이용하여 순사이온전하밀도 및 자계의 상관관계도 고찰하였다.

2. 실험 및 측정방법

그림1은 플라즈마의 발생장치 및 플라즈마 파라메타 측정장치에 대한 개략도를 나타내고 있다. 전극 구성은 2개의 원판상 평행전극을 서로 마주보게 배치한 것으로 직경 5cm, 전극간격 5cm 로 설치하여 진극간에 원통형 플라즈마가 형성되도록 하



A: 음극 B: 양극 C: 코일 D: 저항 E: 직류전원
H: 푸르브 전류 검출용 저항 G: 가스 주입구

그림 1 발생장치 및 측정 시스템 개략도

Fig. 1 Diagram of Experimental setup with plasma generating and measurement apparatus

였다. 플라즈마에 가해지는 자계는 진공조 외부에 2개의 코일 군으로 나누어 각각 3000회로 감아 코일에 흐르는 전류를 가변시켜 0 - 1000[Gauss] 까지 제어할 수 있도록 하였다. 그리고 발생된 플라즈마에 의한 진공조 내부의 온도 상승을 억제하기 위해 진공조를 2중 수냉벽으로 하였다. 진공조내의 진공도는 10^{-6} Torr까지 초기 배기한 후, MFC(Mass Flow Controller)로서 동작 가스유량을 조절할 수 있으며, 본 실험에서는 아르곤-플라즈마를 연구대상으로 하였다.

한편, 전극 공간에서 발생된 아르곤-플라즈마의 특성 실험을

* 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 釜山水産大 專任講師 · 工博

*** 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1995年 7月 4日

最終完了 : 1996年 2月 12日

표 1 스위치 선택 모드 및 측정회로 종류

Table 1 Switch mode and measurement circuits

	S1	S2	S3	측정회로 종류
선택모드	ON	OFF	OFF	나선형 푸르브 측정 회로
	ON	OFF	ON	구형 푸르브 측정 회로
	ON	ON	OFF	페러데이 컵 측정 회로

하기 위한 플라즈마 파라메타 측정 회로는 그림1에 표시된 스위치(S1,S2,S3)의 선택 모드에 따라 나선형 푸르브 회로 및 구형 푸르브 회로 그리고 페러데이 컵(Faraday cup) 회로로서 동작을 하도록 하였고, 표1에 스위치의 선택 모드와 측정회로의 종류를 나타내었다. 측정에 사용된 푸르브의 재질은 텅스텐이고, 푸르브의 형상은 나선형(Φ:0.5mm, 4 turns) 및 구형(Φ:2mm)으로 제작하였다. 페러데이컵의 재질은 스텐레스이고, 형상은 원통형(Φ:0.5mm, L:2cm)이며, 페러데이 컵의 그리드는 100 메쉬(mesh)인 스텐레스 망을 사용하였다. 스위프 발생기(Sweep generator,G-405, H.C)는 삼각파 전압과 구형파 전압을 출력할 수 있도록 전원 모드가 설치 되어 있고, 주파수 및 주사(sweep)시간도 가변시킬 수 있게 되어 있다. 푸르브 및 페러데이 컵의 측정값들은 저장형 오실로스코프(stroage oscilloscope,VC-6275, G.S)의 X-Y 모드에서 관찰 하였다. 이때 푸르브에 인가되는 삼각파 전압은 X축(오실로스코프의 CH1)으로 전송되게 하였고, 푸르브의 전류는 저항R로 통하여 Y축(오실로스코프의 CH2)에 나타나게 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 방전전류 15mA인 조건에서 음극으로부터 직하 약 1.5cm 떨어진 지점에 구형 푸르브(Φ:2mm)를 위치시켜 두고 자계를 90G 로 일정하게 하고 푸르브에 삼각파 전압을 인가한 경우 푸르브에 유입하는 전류파형을 나타내고 있다.

그림 2로부터 알 수 있듯이 푸르브 전류에는 전자전류가 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 그림 3은 그림 2와 같은 조건에서 자계를 150G 로 하였을 때의 푸르브의 전류파형이지만 그림2와는 달리 푸르브에 전자전류가 갑자기 유입되고 있음을 알 수 있다. 이것은 푸르브가 음극 주위에 형성되어 있는 이온시스(ion sheath)내에 있을 때에는 푸르브로 전자전류의 유입이 없지만(그림 2) 자계의 증가로 인하여 음극의 이온시스 두께(음극 양부의 두께)가 감소되어 푸르브로 급격한 전자전류의 유입이 생기기 때문인 것으로 생각된다[1]. 한편, 자계의 증가에 따라 음극의 이온시스 두께가 감소되는 원인은 다음과 같이 생각할 수 있다. 먼저, 자계가 증가하게 되면 등가가스압력은 식(1)에 의해 증가하게 된다[3].

$$P' = P[1 + C(\frac{B}{P})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서,

- P' : 등가 가스 압력
- P : 가스 압력
- B : 자 계
- C : 상 수

한편, 직류 글로우 방전(Glow discharge)에서 음극의 이온시스 두께 d 와 가스압력 p 와의 곱이 거의 일정하므로[2] 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P \text{ (가스압력)} \times d \text{ (음극의 이온시스두께)} = \text{일정} \quad (2)$$

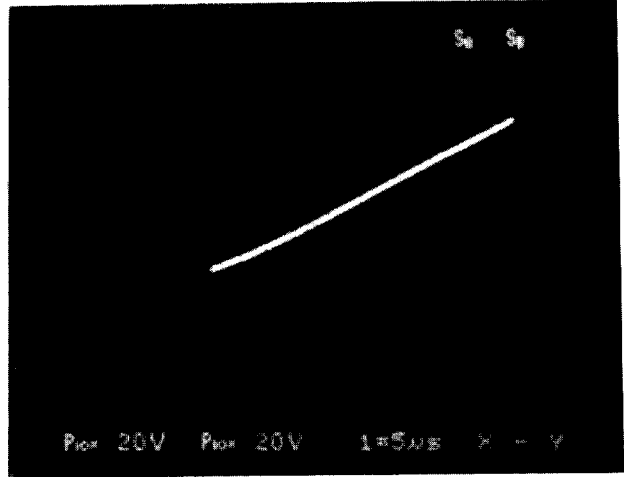


그림 2 압력100mTorr,자계 90Gauss 일때 구형 푸르브의 삼각 파전압에 따른 I-V 특성곡선 (CH1: 삼각파전압, CH2: 푸르브 전류) (CH1:X-축, 2 V/div., CH:Y-축, 2 V/div.)

Fig. 2 I-V characteristic curve by spherical probe at pressure 100mTorr, magnetic field 90Gauss

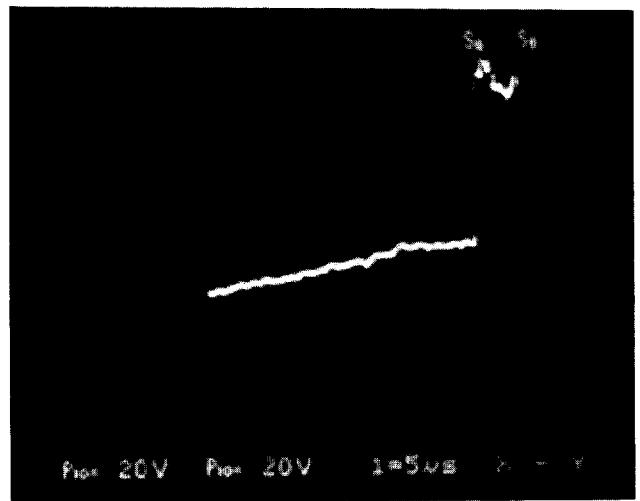


그림 3 압력100mTorr,자계 150Gauss 일때 구형 푸르브의 삼각 파전압에 따른 I-V 특성곡선 (CH1: 삼각파전압, CH2: 푸르브 전류)(CH1:X-축, 2 V/div.,CH:Y-축, 2V/div.)

Fig. 3 I-V characteristic curve by spherical probe at pressure 100mTorr, magnetic field 150Gauss

한편, 자계의 영향이 있을 경우 (2)식은 다음 (3)식과 같이 나타낼 수 있다[3]. 즉,

$$P'(\text{등가 가스 압력}) \times d(\text{음극의 이온시스두께}) = \text{일정} \quad (3)$$

식(1)로 부터 알 수 있듯이 자계가 증가하면 등가가스압력은 증가하게 되고 이로 인해 음극의 시스두께 d 는 식(3)에서와 같이 감소하게 된다. 따라서 그림 2와 그림 3에서 나타난 바와 같이 음극의 이온 시스내에 푸르브가 있을 때에는 푸르브 회로에는 전자전류가 흐르지 않지만 자계를 증가시킬수록 푸르브는 점차 음극의 이온시스 영역에서 벗어나므로 푸르브 회로에 전자전류가 흐르게 됨을 알 수 있다[1].

그림 4, 그림 5, 그림 6은 각각 자계를 200G, 260G, 300G로 증가시켰을 때 삼각과 전압(X-축; 오실로스코프의 CH1)에 대한 푸르브 전류(Y-축; 오실로스코프의 CH2)를 나타낸 그림들이다. 그림 4, 그림 5 및 그림 6들로부터 알 수 있듯이 자계가 증가될수록 평균전자전류는 거의 지수함수적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

결국, 그림 3, 그림 4, 그림 5 및 그림 6 등에서와 같이 푸르브 회로에 급격한 전자전류가 흐르는 것은 자계 증가에 따른 음극의 시스 두께의 감소가 전자에 대해 전위장벽의 구실을 하는 음극의 시스 전위(sheath potential)를 감소시키기 때문임을 알 수 있다[1]. 0.1~10 Torr의 압력범위에는 Schottky의 양극성 확산이론이 적용된다. 본 실험의 경우, 실험압력은 0.1Torr이나 $\frac{\lambda_e}{r_e} \gg 1$ (λ_e : 전자의 평균자유행정, r_e : 전자의 라오마반경) 가 성립하므로 양극성 확산계수를 도입할 수 있다. 한편, 등가가스압력을 나타내는 식(1)과 양극성 확산을 나타내는 식(4)[4]에서 등가가스압력과 양극성 확산과의 관계식(5)를 얻을 수 있다.

$$D_a = \frac{D_e}{(\mu_e B)^2} \quad (4)$$

여기서,

D_a : 양극성 확산 계수

D_e : 자계가 없을 때, 전자의 확산 계수

μ_e : 전자의 이동도

B : 자 계

$$P' = P \left[1 + C \left(\frac{1}{\mu_e^2 P^2} \cdot \frac{D_e}{D_a} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서,

P' : 등가 가스 압력

P : 가스 압력

C : 상 수

D_a : 양극성 확산 계수

D_e : 자계가 없을 때, 전자의 확산 계수

μ_e : 전자의 이동도

식(5)에서 양극성 확산 계수 D_a 와 등가 가스 압력 P' 는 서로 반비례 관계임을 알 수 있다. 따라서 자계가 증가하면 양극성 확산은 감소하고 등가가스압력은 증가하여 식(3)에서 알 수 있듯이 음극의 시스두께는 감소하게 됨을 알 수 있다.

한편, 진공조 벽으로 향하는 전자의 양극성 확산에 미치는

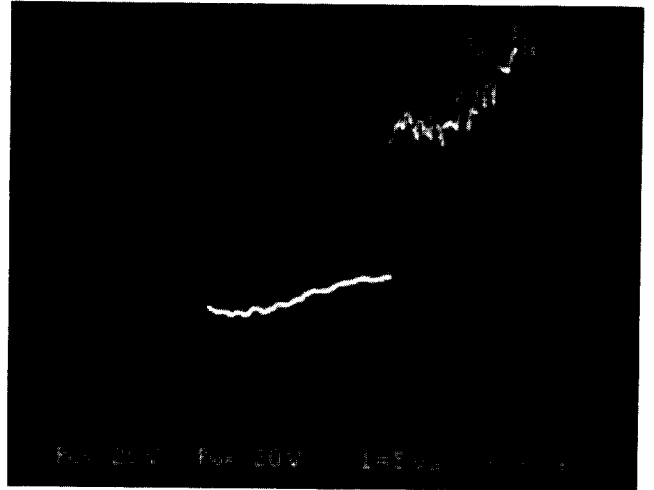


그림 4 압력100mTorr,자계 200Gauss 일때 구형 푸르브의 삼각 과전압에 따른 I-V 특성곡선 (CH1: 삼각과전압, CH2: 푸르브 전류)(CH1:X-축, 2 V/div.,CH:Y-축, 2 V/div.)

Fig.4. I-V characteristic curve by spherical probe at pressure 100mTorr, magnetic field 200Gauss

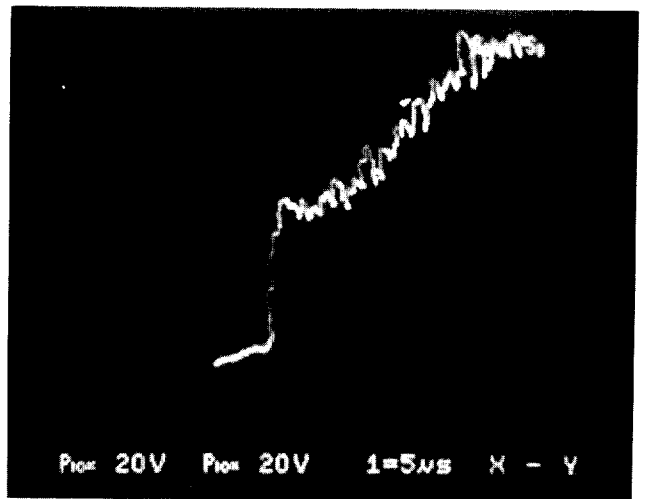


그림 5 압력100mTorr,자계 260Gauss 일때 구형 푸르브의 삼각 과전압에 따른 I-V 특성곡선(CH1:삼각과전압, CH2:푸르브전류)(CH1:X-축,2V/div.,CH:Y-축, 2V/div.)

Fig.5. I-V characteristic curve by spherical probe at pressure 100mTorr, magnetic field 260Gauss

자계의 영향을 실험적으로 규명하기 위하여 2 전류법(two-current method)[5]을 이용하였다. 이 방법은 두개의 푸르브에 동시에 서로 상이한 전압을 인가하는 방식과 하나의 푸르브에 서로 상이한 전압을 빠르게 변화시키는 방식이 있으나[5] 본 실험에서는 후자의 방식을 이용하였다. 즉, 나선형 푸르브에 교번하는 펄스 전압을 인가하여 푸르브에 유입하는 전류를 전자전류 성분과 이온전류 성분으로 분리하여 양극성 확산에 주된 기여를 하는 전자전류와 자계의 상관관계를 고찰하였다.

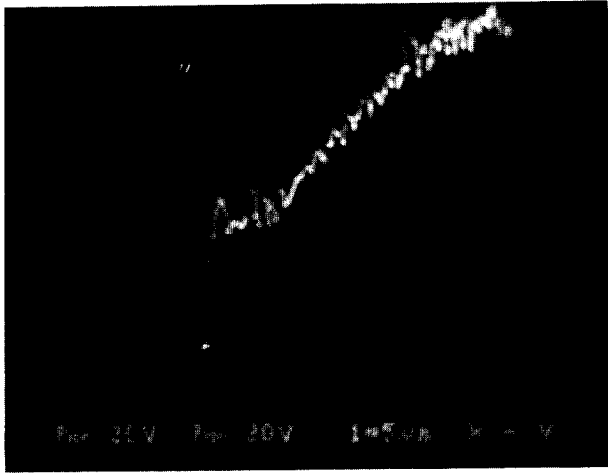


그림 6 압력100mTorr, 자계 300Gauss 일때 구형 푸르브의 삼각 파진압에 따른 I-V 특성곡선 (CH1:삼각파진압, CH2:푸르브전류)CH1:X-축,2V/div.,CH:Y-축, 2V/div.)
 Fig. 6 I-V characteristic curve by spherical probe at pressure 100mTorr, magnetic field 300Gauss

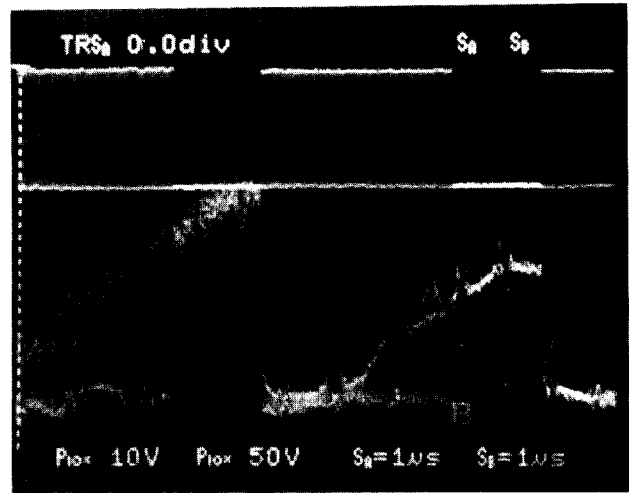


그림 8 압력100mTorr, 자계 170Gauss 일때 나선형 푸르브의 펄스전압에 따른 I-V 곡선(CH1은 펄스전압, CH2는 probe 전류; A : 전자전류, B: 이온전류)(CH1: 1 V/div., CH2: 5 V/div.)
 Fig.8 I-V curve by helical probe at ressure 100mTorr,1. magnetic field 100Gauss

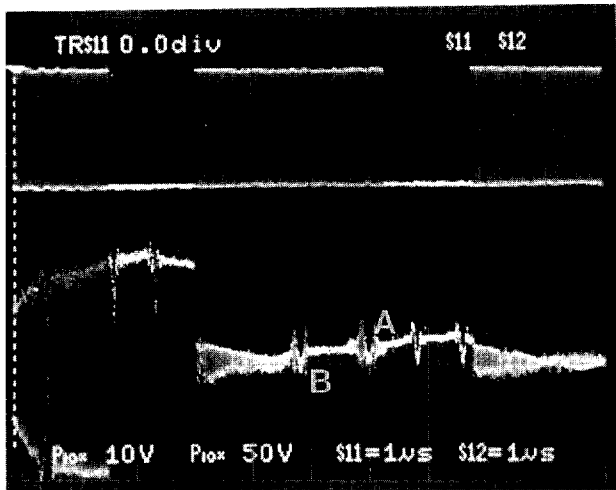


그림 7 압력100mTorr, 자계 100Gauss 일때 나선형 푸르브의 펄스전압에 따른 I-V 곡선 (CH1: 펄스전압, CH2: 푸르브 전류; A : 전자전류, B: 이온전류)(CH1: 1 V/div., CH2: 5 V/div.)
 Fig. 7 I-V curve by helical probe at ressure 100mTorr, magnetic field 100Gauss

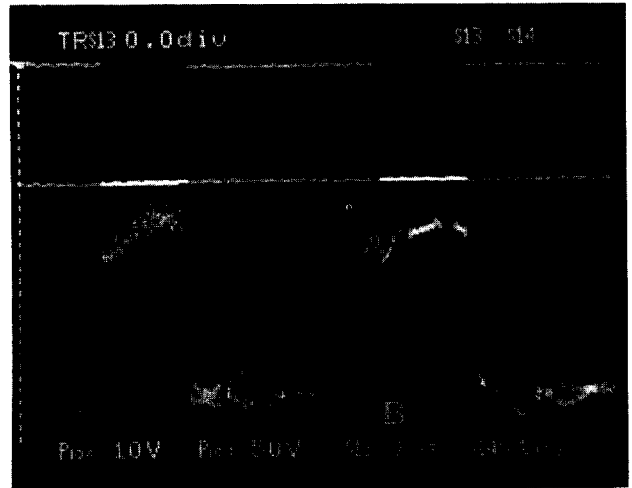


그림 9 압력100mTorr, 자계 240Gauss 일때 나선형 푸르브의 펄스전압에 따른 I-V 곡선(CH1은 펄스전압, CH2는 probe 전류; A : 전자전류, B: 이온전류)(CH1: 1 V/div., CH2: 5 V/div.)
 Fig.9 I-V curve by helical probe at ressure 100mTorr, magnetic field 240Gauss

그림 7, 그림 8, 그림 9 및 그림 10은 나선형 푸르브를 음극 및 양극의 중심축의 중앙 부분에서 2.5cm 떨어진 지점에 위치 시켜두고 자계를 각각 100G, 170G, 240G, 300G 로 일정히 유지 한 상태에서 푸르브에 교번하는 펄스 전압을 인가하여 얻어진 결과물로서 이들 그림에서 오실로스코프의 CH 1 파형은 푸르브에 인가된 펄스 전압이며, 오실로스코프의 CH 2 파형에서 A 파형은 전자전류파형을 나타내고, B 파형은 이온전류파형을 나타내고 있다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 자계가 증가하면 이온전류는 거의 일정하게 유지하는 반면에 전자전류는 점차 증가되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 자계가 증가될수록 이에

상응하여 푸르브 전류중의 전자전류성분이 증가하는 것은 전자들이 진공조 벽으로 향하는 양극성 확산이 억제되기 때문이다. 자계가 증가될수록 전자의 양극성 확산이 억제되는 원인은 식 (6)에서 알 수 있듯이 자계의 증가에 따라 전자의 라모아 반경이 감소하기 때문인 것으로 생각된다[4].

$$r_e = \frac{mv}{eB} \tag{6}$$

여기서,

- r_e : 전자의 라모아 반경
- m : 전자의 질량
- e : 전자의 전하량
- B : 자속 밀도
- v : 자계에 대한 전자의 수직 속도 성분

그림 11은 페러데이 컵(Faraday cup)[6]의 그리드(grid)는 접지시키고, 원통형인 이온 콜렉터(collector)에 펄스전압 및 부의 직류전압을 인가하여 얻어진 이온신호전압을 나타내는 그림이다. 이때 실험조건은 동작압력 100mTorr, 자계는 300G 였고 전극간에 형성되어 있는 원통형 플라즈마의 경계로부터 3mm 떨어진 지점에 페러데이 컵의 그리드를 위치시켰다. 또한 페러데이 컵의 이온 신호(ionic signal)를 검출하기 위하여 저항 580[Ω]을 사용하였으며 페러데이 컵의 이온포집면적 A는 2.84[cm²]이다. 한편, 페러데이 컵을 이용하여 얻어지는 이온신호전압(ionic signal voltage; 그림 11에 있는 저항 580[Ω] 양단 전압)으로 부터 순시이온전하밀도를 구하기 위한 관계식은 다음과 같이 구할 수 있다. 순시이온전류밀도와 이온 신호 전압은 어떤시간 t 에서 식(7)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$V(t) = I(t) \times R = J(t)AR \tag{7}$$

여기서,

- $V(t)$: 어떤 시간 t 에서의 이온 신호 전압
- $J(t)$: 어떤 시간 t 에서의 순시이온전류밀도
- A : 페러데이 컵의 이온 포집 면적
- R : 이온 신호 검출용 저항
- I(t) : 순시이온 전류

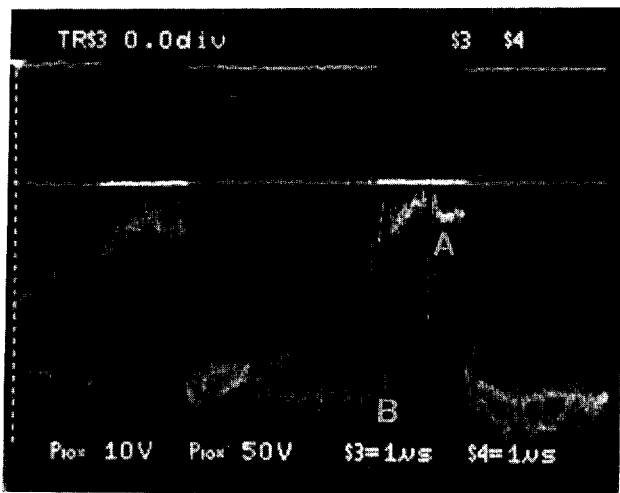


그림 10 압력100mTorr, 자계 300Gauss 일때 나선형 푸르브의 펄스전압에 따른 I-V 곡선 (CH1은 펄스전압, CH2는 probe 전류; A : 전자전류, B: 이온전류)(CH1: 1 V/div., CH2: 5 V/div.)

Fig. 10 I-V curve by helical probe at ressure 100mTorr, magnetic field 100Gauss

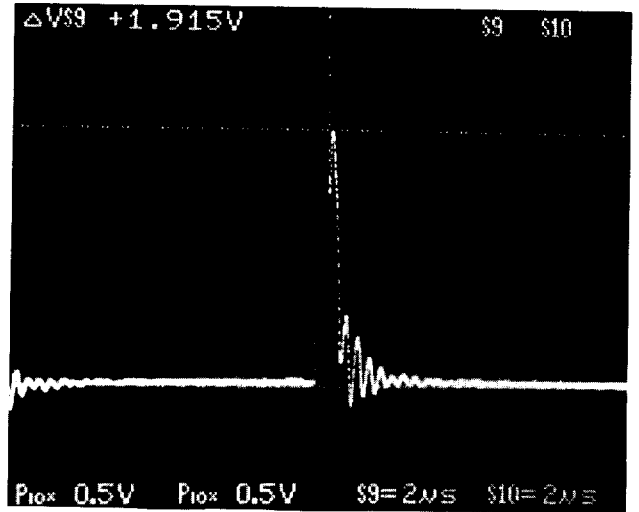


그림 11 압력 100mTorr, 자계 300Gauss 일때, 펄스전압에 따른 페러데이 컵 신호전압 (time div. 2μsec , vol tage div. 0.5V)

Fig. 11 Faraday cup signal at pressure 100mTorr, magnetic field 300Gauss

한편, 이온전류밀도는 식(8)로써 나타낼 수 있다[7].

$$J(t) = en(t)v \tag{8}$$

여기서,

- $J(t)$: 어떤 시간 t 에서의 순시이온전류밀도
- e : 이온의 전하량
- $n(t)$: 어떤 시간 t 에서의 순시이온전하밀도
- v : 이온의 평균 속도

식(8)을 식(7)에 대입하여 정리하면 순시이온전하밀도를 나타내는 식(9)를 얻을 수 있다.

$$n(t) = \frac{V(t)}{eARv} \tag{9}$$

여기서,

- $n(t)$: 어떤 시간 t 에서의 순시이온전하밀도
- $V(t)$: 어떤 시간 t 에서의 이온신호전압
- R : 이온 신호 검출용 저항
- e : 이온의 전하량
- A : 페러데이 컵의 이온 포집 면적
- v : 이온의 평균 속도

한편 이온들의 공간전하에 의한 전계효과를 무시하면 식(9)의 이온 평균 속도는 식(10)으로서 나타낼 수 있다[8].

$$v = \left(\frac{8kT_i}{\pi M} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

여기서,

- v : 이온의 평균 속도

k : 볼츠만 상수
 T_i : 이온의 온도
 π : 원주율
 M : 이온의 질량

식(10)을 식(9)에 대입시키면 이온신호전압과 순시이온전하밀도의 상관 관계식 (11)을 얻을 수 있다. 그림 11에서 알 수 있듯이 이온신호전압은 1.915[V]였으며 이값을 식(11)에 대입하면 순시이온전하밀도는 $1.9 \times 10^{11} [\text{cm}^{-3}]$ 가 얻어졌다. 한편, 그림 11의 이온 신호 전압은 자계의 변화에 관계없이 일정하게 얻어졌는데, 이는 본 실험에서 사용된 자계값이 아르곤 이온에 영향을 미칠 만큼 충분히 크지 못하기 때문이라 생각된다[9].

$$n(t) = (\pi M)^{\frac{1}{2}} \frac{V(t)}{(eAR)(8kTi)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

4. 결 론

평행 평판형 전극에 직류전압 및 자계를 인가하여 얻어진 자화 플라즈마에서 자계를 변화시켰을 때 Langmuir 푸르브(구형 및 나선형) 및 페러데이 컵을 사용하여 얻어진 플라즈마 파라메타와 자계의 상관관계를 정리하면 다음과 같다.

자계를 증가시키면, 자계효과에 의한 등가가스압력이 증가하므로 시스전위 및 시스두께가 감소하게 되어 푸르브로 급격한

전자전류가 유입된다. 그리고 2 전류법을 이용하여 전자의 양극성 확산이 자계에 의해 억제됨을 실험적으로 알 수 있었고, 자계하의 등가가스압력과 양극성 확산의 상관관계로부터 음극의 시스 두께가 감소함을 알 수 있었다. 더우기 페러데이 컵(Faraday cup)을 사용하여 플라즈마의 순시 이온 전하 밀도를 측정해 본 결과로부터 플라즈마의 순시 이온 전하 밀도(peak ion charge density)는 자계의 영향을 거의 받지 않았음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Chung Chan et al., J. Appl. Phys., vol. 62(5), p.1633, 1987.
- [2] P. Bletzinger et al., J. Appl. Phys., vol. 62(12), p.4688, 1987.
- [3] 武田 進, 氣體放電の基礎, 東京電氣大學出版局, 1990, pp. 83-87.
- [4] 林 泉, フラズマ工學演習, 朝倉書店, 1988, 第 8 章.
- [5] S. Teii et al., 日本電氣學會, EP-9-17, p. 39, 1993.
- [6] Dennis M. Manos and Daniel L. Flamm, Plasma Etching, ACADEMIC PRESS, 1989, pp.400 - 403
- [7] Bassoud Badaye et al., IEEE Trans. on PLASMA SCIENCE, vol. 19(5) OCT. 1991. p.872
- [8] David N. Ruzic, AVS Monograph series, Ed.W.Weed, 1994, pp. 1-16
- [9] J.L. Ferreira, IEEE Trans. on PLASMA SCIENCE, vol. 20(6), DEC. 1992, p.988

저 자 소 개



김 두 환 (金斗煥)

1961년 4월 13일생. 1988년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학중

조 정 수 (曹井守)

전기학회논문지 제45권 제2호 참조

박 정 후 (朴正后)

전기학회논문지 제45권 제2호 참조



장 윤 석 (張允碩)

1962년 2월 26일생. 1985년 2월 부산대 공대 전자공학과 졸업. 1988년 2월 부산수산대 대학원 전자통신 공학과 졸업(석사). 1995년 3월 일본도호쿠대학 대학원 전기 및 통신 공학 전공(박사). 현재 부산수산대 전임강사