

2계 미분기를 이용한 자화플라즈마의 전자에너지 분포함수의 측정에 관한 연구

김두환, 성열문, 신중홍#, 손재봉*, 조정수, 박정후
부산대 전기공학과, # 동의대 전기공학과, * 부산전대 전기과

A Study on the Measurement of Electron Energy Distribution Function in Magnetoplasma with 2-stage Differentiators

D.H. Kim, Y.M. Sung, J.H. Shin #, J.B. Son *, J.S. Cho, C.H. Park
Department of Electrical Engineering, Pusan National University
Department of Electrical Engineering, Dong Eui University
* Department of Electrical Engineering, Pusan Junior College

Abstract- In this paper, We can obtain Electron energy distribution function (EEDF) by using two Differentiators.

In addition, We investigate the characteristics of EEDF as function of the position of probe, magnetic field, and pressure.

1. 서론

Langmuir 푸르브를 사용하여 얻어진 전류-전압 특성곡선으로부터 플라즈마의 파라미터를 정확하게 측정하기 위해서는 플라즈마의 전자 에너지(속도)는 맥스웰 분포(Maxwell Distribution)를 따라야 한다는 점이다. 이와같이 플라즈마의 특성 진단에 있어 플라즈마의 전자 에너지가 맥스웰 분포를 하고 있는지를 규명하기 위해서 일반적으로 이용되는 방법은 Druyvesteyn의 식을 이용하게 된다.[1]

즉, 푸르브에 인가된 전압 주파수에 대해 이것의 2배에 해당하는 푸르브 전류를 검출하여 전자 에너지 분포함수를 얻는 제2고조파법과 푸르브 전류를 푸르브에 인가된 전압에 대해 2회 연속 미분을 하여 전자 에너지 분포함수를 구하는 2회 미분법등이 있다.[2]

한편, 플라즈마의 상태가 변하기 전에 푸르브 측정을 하기 위하여 푸르브에는 매우 빠르게 스위칭하는 전압을 가하기 때문에[3] Lock-in Amplifier로써 푸르브의 제2고조파 성분의 전류를 평균화하여 전자 에너지 분포함수를 구하는 제2고조파법은 Lock-in Amplifier에서 푸르브의 제2고조파 성분의 전류를 평균화하는데 상당한 시간을 요하므로, 정확한 전자 에너지 분포함수를 구하지 못하는 단점이 있다[2]

본 논문에서는 푸르브 전류를 푸르브에 인가된 전압에 대해 2회 연속 미분을 하여 전자 에너지 분포함수를 구하는 2회 미분법을 이용하였다.

2. 실험 장치

2-1. 푸르브 측정 시스템 및 자화 플라즈마 발생 장치

그림1은 푸르브 측정 시스템 및 플라즈마의 발생 장치의 개략도를 나타내고 있다. 그림에서 램프 발생기는 출력전압이 +40 - -40[V]이며, 최대 출력전류는 2000[mA]로서 이 전류값은 플라즈마를 부하로서 고려했을 때, 부하의 변동에 대해서도 출력 전압이 변함없이 유지될 수 있는 충분한 전류용량이다.

측정에 사용된 푸르브의 재질은 텅스텐이고, 푸르브의 형상은 원통형(φ:0.5mm)으로 제작하였고, 플라즈마에 노출되는 푸르브의 길이는 2mm 였다. 푸르브 측정값들은 저장형 오실로스코프(stroage oscilloscope, VC-6275, G.S)의 X-Y 모드에서 관찰하였다. 이때 푸르브에 인가되는 전압은 X축(오실로스코프의 CH1)으로 전송되게 하였고, 2회 미분된 푸르브 전류는 Y축(오실로스코프의 CH2)에 나타나게 하였다. 한편, 방전전극의 구성은 황동이 계절이며 직경 5cm 인 원판형의 두 전극을 간격 5cm 로 하여 평행 평판형 전극간에 원통형 플라즈마가 형성되도록 하였다. 플라즈마에 가해지는 자계는 진공조 외부에 2개의 코일군으로 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 있었고, 본 실험에서는 아르곤-플라즈마를 연구대상으로 하였다.

2-2. 2회 연속 미분회로

그림2는 푸르브 전류를 푸르브에 인가된 전압에 대해 2회 연속미분이 가능한 미분회로를 나타내고 있다. 그림에 나타나 있는 OP 앰프는 시간 영역(time domain)에서 미분동작을 하므로 식(1)로 표현되는 전압 도메인(voltage domain)에서 미분을 수행

해야 하는 Druyvesteyn 식을 회로적으로 구현할 수 없는 문제가 생긴다.

$$F(\epsilon) = \frac{2}{eA} \left(\frac{2mV_p}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{d^2 I_p}{dV_p^2} \quad (1)$$

하지만 푸르브에 인가되는 전압이 식(2)와 같이 표현되는 시간적으로 선형성을 가지는 파형이 되면 이와같은 문제는 해결될 수 있다.

$$V_p = kt \quad (2)$$

즉, 식(2)를 식(1)에 대입시키면 식(3)이 되고, 식(3)에서 알 수 있듯이 푸르브 전류를 시간 도메인에서 2회 미분을 하더라도 Druyvesteyn 식을 만족시킨다.

$$F(\epsilon) = \frac{2}{eA} \left(\frac{2mV_p}{e} \right)^{\frac{1}{2}} k^{-1} \frac{d^2 I_p}{dt^2} \quad (3)$$

따라서 본 실험에서 푸르브에 인가되는 전압은 시간적으로 선형성을 가지는 톱니파 전압을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

방전전류 13mA, 자계 170Gauss 인 조건에서 방전 전극의 중심축으로 부터 푸르브의 위치를 1cm, 4cm, 6cm로 변화시키면서 전자에너지 분포함수를 측정 한 결과들은 각각 그림3, 그림4, 그림5 등이다.

그림들에서 알 수 있듯이 전자에너지 분포함수는 푸르브의 위치가 전극의 중심축으로 부터 1cm, 4cm 에 있을 때에는 거의 변화가 없이 일정하게 나타났지만, 6cm지점에서는 1cm, 4cm지점들에 비해 고에너지 를 가진 전자들이 많이 분포함을 알 수 있다.

그림6, 그림7, 그림8들은 방전전압 550[V], 압력 100mTorr인 조건에서 각각 자계를 70Gauss, 120Gauss, 200Gauss로 변화시켰을 때 얻어진 그림이다. 그림들에서 알 수 있듯이 자계를 증가시킬수록 전자에너지 분포곡선상에서 전자의 최확에너지(most probable energy; 분포곡선상에서 피크치 부분)는 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다.

그림9, 그림10, 그림11들은 방전전압 550[V], 자계 120Gauss인 조건에서 각각 압력을 100mTorr, 80mTorr, 60mTorr로 변화시켰을 때 얻어진 그림이다. 압력이 감소할수록 전자밀도(전자에너지 분포함수 곡선의 면적)는 감소하였고, 플라즈마 공간전위(전자에너지 분포함수 곡선과 X-축과 교차하는 점)는 증가하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

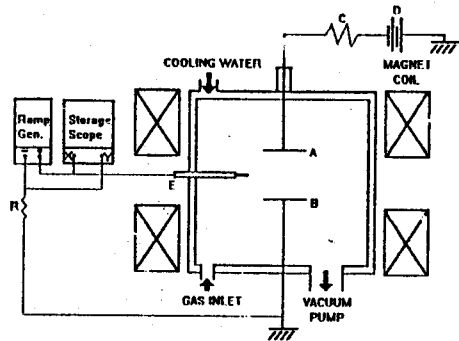
본 연구에서는 싱글 푸르브로서 자화플라즈마의 전

자에너지 분포함수를 자계, 압력, 방전전극의 중심축으로 부터 푸르브의 위치를 변화시켰을 때의 실험결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 방전전극의 중심축으로 부터 푸르브의 위치를 1cm, 2cm로 했을 때의 전자에너지 분포함수는 거의 변화가 없이 일정하게 나타났지만, 6cm지점에서는 1cm, 4cm지점들에 비해 고에너지를 가진 전자들이 많이 분포함을 알 수 있었다.
2. 자계를 증가시킬수록 전자에너지 분포곡선상에서 전자의 최확에너지는 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다.
3. 압력이 감소할수록 전자밀도는 감소하였고, 플라즈마 공간전위는 증가하였음을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] Kouun Shirai et al., J. J. Appl. Phys., vol. 28(5), 1989, p.897.
 [2] V.Godyak et al., Phys. Rev. A, vol. 38(4), p.2044, 1988.
 [3] Fumiyuki Fujita et al., J. J. Appl. Phys., vol. 27(8), p.1477, 1988.



A: 음극 B: 양극 C: 저항 D: 직류전원 R: 푸르브 간격을 저항
 그림1. 플라즈마 발생장치 및 측정 시스템 개략도.

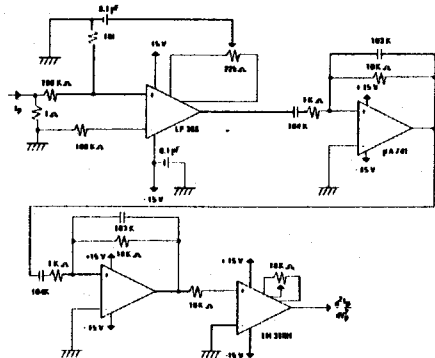


그림2. 2회 미분회로 회로도

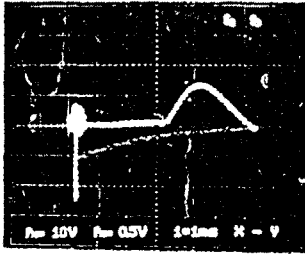


그림3. 방전전극의 중심축에서 1cm지점의 전자에너지분포함수

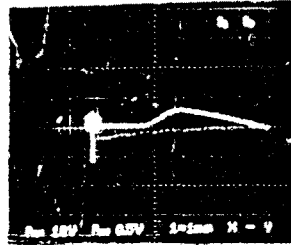


그림8. 자계 200Gauss일때 전자에너지분포함수

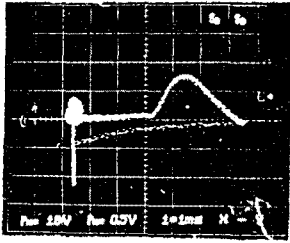


그림4. 방전전극의 중심축에서 4cm지점의 전자에너지분포함수

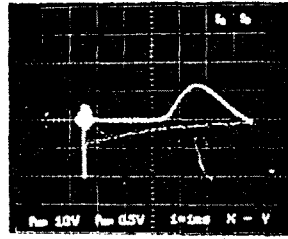


그림9. 압력 100mTorr 일때 전자에너지분포함수

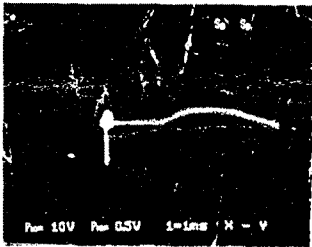


그림5. 방전전극의 중심축에서 6cm지점의 전자에너지분포함수

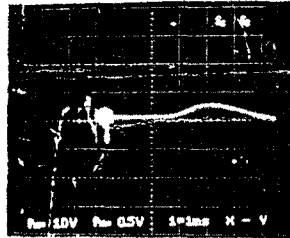


그림10. 압력 80mTorr 일때 전자에너지분포함수

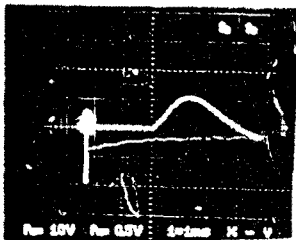


그림6. 자계 70Gauss일때 전자에너지분포함수

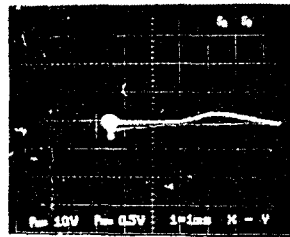


그림11. 압력 60mTorr 일때 전자에너지분포함수

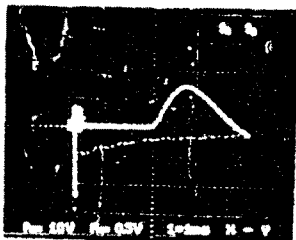


그림7. 자계 120Gauss일때 전자에너지분포함수