

펄스 모듈레이션된 고주파 플라즈마의 시변 특성

이선홍, 이대성, 조용성, 김동현, 이호준, 박정후
부산대학교 전기공학과

Time variation characteristic of pulse-modulated high frequency plasma

S.H.Lee, D.S.Lee, Y.S.Jo, D.H.Kim, H.J.Lee, C.H.Park
Pusan National University

Abstract - From the plasma application point of view, electron temperature and density are one of the most important parameters for plasma process. But it is only available to control plasma by adjusting external factors like gas pressure and input power.

In this paper, pulse-modulated plasma is generated by modulating 13.56GHz RF power with 1, 5, 10kHz pulse. And Langmuir probe technique is used to study the distribution of electron temperature and density. When modulated pulse is off, electron temperature decreases gradually in form of exponential decay. The value τ of exponential decay slope is 33.619, 13.834, 10.803 in 1kHz, 5kHz, 10kHz. This implies that this method can be used to control electron temperature and density.

되는 RF 자속이 인접 방전영역 속으로 침투해 들어가며 패러데이 전자유도 법칙에 의한 RF 전계성분이 발생한다. 이것이 유도성 전계로서 방전내의 자유전자를 가속시키게 되며 방전을 형성하게 된다.^[3] 실험에 사용되는 탐침봉은 반경 75 μ m, 길이 7mm의 텅스텐 선을 사용하였고 유리로 절연시킨 단일 탐침봉으로 제작하였다. 그리고 MFC 밸브를 통하여 Ar 가스를 방전 챔버 안에 유입시켜 압력을 5~50mTorr까지, RF 출력을 100~700W까지 변화시켜 플라즈마를 발생시킨 후 probe에 인가하는 전압을 증가시키며 전류를 측정하였다. RF 전원을 pulse modulation한 플라즈마의 조건은 Ar 15sccm, 압력 10mTorr, 입력전력 300W이다.

Fig.1은 전원을 pulse modulation했을 때 probe에 인가해주는 전압과 그에 따른 전류의 그래프이다. 전원 pulse가 on, off 될 때마다 플라즈마 역시 on, off 되는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 수집한 데이터들 중에서 100개의 pulse 각각의 on 시점으로부터 일정한 시간 후의 V-I 데이터를 수집할 수 있는 프로그램을 설계하였다.

1. 서 론

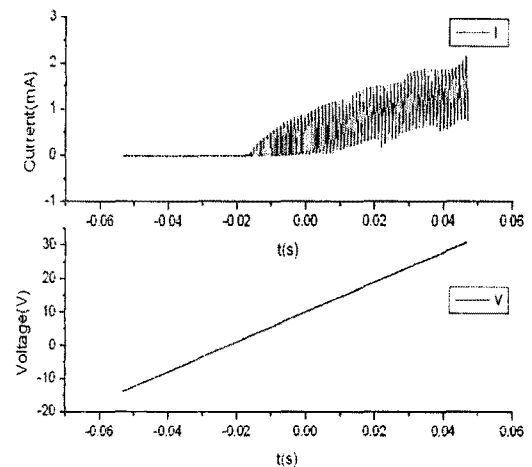
플라즈마는 박막 디바이스 제작, 반도체 식각, 증착, 용접 및 신소재 개발 등에 많이 이용되고 있다.^[1] 리액터 내에서의 증착이나 식각반응의 과정은 플라즈마 내부의 다양한 중성 화학종들 및 이온과 기판과의 상호작용에 의해 진행되므로 이온 및 중성 활성종의 종류, 밀도, 에너지 등이 해당 공정의 직접적인 변수가 된다. 그러나 이러한 플라즈마의 내부 변수들을 직접 제어할 수 없는 제한이 있어 통상 투입전력, 가스의 종류와 유량, 압력 등 외부에서 제어 가능한 변수를 통해 실험적, 통계적으로 공정개발을 해오고 있다. 따라서 리액터 내부 변수의 직접적인 제어의 필요성이 점차 대두되고 있으며 향후 플라즈마 장비의 개발은 플라즈마 내부 변수의 직접적인 제어를 통해 한 단계 진보된 공정을 가능케 하는 방향으로 전개될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 전원을 pulse modulation함으로써 전자온도와 밀도가 제어 가능한지에 대해 확인해 보았다. RF 전원을 다양한 주파수로 pulse modulation하여 발생시킨 플라즈마에서 Langmuir probe^[2]를 이용하여 V-I 그래프 및 전자온도와 밀도의 시변 특성을 측정하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법 및 장치

본 실험에서는 13.56GHz RF 유도 결합형 플라즈마가 사용되었다. 이는 코일형 전극과 같은 유도성 회로요소를 방전영역에 설치하여 RF 전계 에너지를 전리기에 전달하여 발생시킨 플라즈마를 말한다. 즉, 유도회로에 큰 고주파 전류를 흐르게 하면, 이 전류에 의해 생성



2.2 이론적 배경

Maxwellian 속도 분포를 가지는 플라즈마에서 탐침에 흐르는 전자 전류 I_e 는 플라즈마 전위(V_p) 및 바이어스 전압(V_B)의 함수로서

$$I_e = n_e \exp\left(\frac{-e(V_p - V_B)}{T_e}\right)$$

와 같이 주어진다.

플라즈마 전위는 얻어진 probe의 전류를 전압에 대하여 2계 미분하여 그 값이 0이 되는 probe 전압으로써

터 결정하였다. 전자의 밀도는 probe의 전자 포화전류 I_{esat} , 전자온도 kT_e , probe 면적 A 로부터

$$n_e = \frac{(I_{esat}/eA)}{(kT_e/2\pi m_e)^{1/2}}$$

의 관계로부터 구하였고 여기서 전자의 온도는 다음과 같은 관계에서

$$\ln(I_e) \propto V_B/Te$$

probe의 V - $\ln I$ 곡선의 직선부분 기울기의 역수로부터 구하였다.

전자의 온도는 입자 보존식으로부터 그 경향을 파악할 수 있다. 정상상태에서는 하전입자의 손실과 ionization에 의한 생성률은 균형을 이루어야 하므로 균일한 밀도 분포를 가지는 플라즈마의 경우 근사적으로 다음과 같은 particle balance을 만족한다.

$$n_0 u_B S = K_i n_g n_0 V$$

여기서 n_0 , n_g , u_B 는 전자(이온)밀도, 중성기체 밀도, Bohm velocity를 나타내고 K_i 는 ionization rate, S 와 V 는 각각 손실면적과 부피를 나타낸다. 전자의 온도에 명확히 의존하는 변수인 이온화율과 Bohm velocity에 대한 식으로 정리하면 아래와 같다.

$$\frac{K_i(T_e)}{u_B(T_e)} = \frac{S}{n_g V}$$

이온화율은 통상 지수함수적으로 증가하고 Bohm velocity $\sqrt{T_e}$ 에 비례하므로 용기의 부피가 작아지거나 중성입자의 밀도가 감소하면 T_e 가 증가함으로써 평형이 유지된다.

3. 결과 및 토론

3.1 입력전력과 챔버압력에 따른 전자온도 및 밀도 변화

Fig.2는 RF 출력을 100~700W까지 변화시켰을 때의 전자밀도와 온도 그래프이고 Fig.3는 챔버 압력을 5~50mTorr까지 변화시켰을 때의 전자온도와 밀도의 그래프를 나타내고 있다.

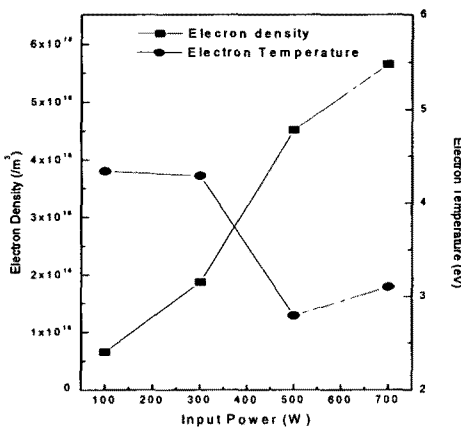


Fig.2. 입력전력에 따른 전자온도 및 밀도 변화

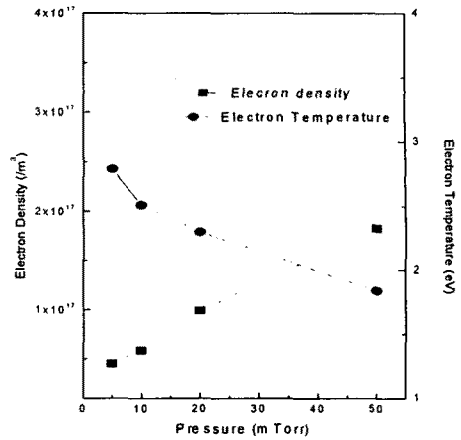


Fig.3. 챔버압력에 따른 전자온도 및 밀도 변화

3.2 전원을 Pulse modulation한 플라즈마 특성

Ar 15sccm, 압력 10mTorr, 입력전력 300W의 조건 하에 RF 전원을 1, 5, 10kHz로 pulse modulation하여 발생한 플라즈마에서 각 주파수의 시변에 따른 V - I 곡선을 구할 수 있었다. Fig.4는 그 중 5kHz로 pulse modulation한 데이터를 pulse가 on 된 시작점으로부터 10us, 30us, 50us, ..., 190us까지 일정 시간 후의 V - I 곡선들을 나타낸 것이다. 그래프의 오른쪽 곡선들이 pulse가 on일 때, 왼쪽 곡선들이 off일 때의 V - I 곡선들이다. 그래프의 오른쪽 on 상태에서의 V - I 곡선이 전형적인 V - I 특성곡선의 형태를 취한다는 것을 확인할 수 있다.

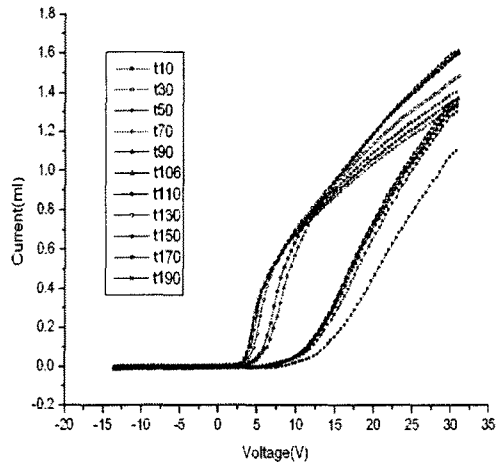


Fig.4. 5kHz pulse modulation한 플라즈마의 시간에 따른 V - I 곡선

Fig.5은 Fig.4의 그래프에서 y 값인 I 값을 로그값을 취한 V - $\ln I$ 곡선이다. 앞에서 설명한 바와 같이 이 때의 기울기의 역수로 T_e 를 알 수 있는데 그 기울기가 그래프의 오른쪽 on 상태에서 왼쪽의 off 상태로 갈수록 커진다는 것을 알 수 있다. 즉, 기울기의 역수인 T_e 는 off 상태에서 작아진다. 그리고 pulse가 off 된 후 T_e 가 바로 떨어지는 것이 아니라 서서히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

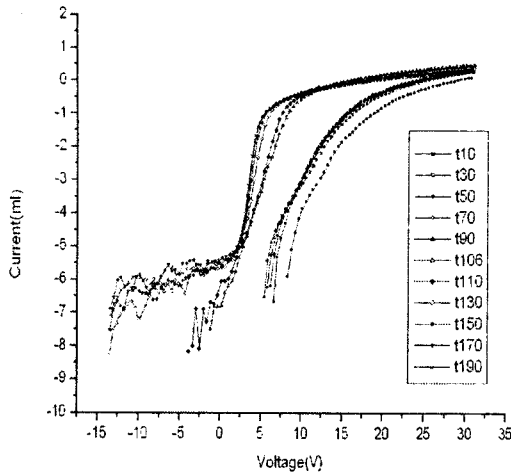


Fig. 5. 5kHz pulse modulation한 플라즈마의 시간에 따른 V-lnI 곡선

Fig. 6, 7, 8은 Fig. 4, 5에서 구한 Te와 Ie를 이용해 구한 Ne를 그래프로 나타낸 것이다. x축은 시간을 나타내며 왼쪽 y축은 전자온도를, 오른쪽 y축은 전자 밀도를 나타낸다. 먼저 Ne에 대해 살펴보면, Ne는 pulse가 on 되기 시작되면서 증가하다가 pulse의 on 종료 시점 근처에서 peak 값을 가진다. 그리고 pulse가 off 된 후에는 감소한다. Te 역시 pulse의 on 초반 구간에서 peak 값을 가지며 서서히 감소하다가 pulse가 off 되면 좀 더 급격하게 감소한다는 것을 확인할 수 있다. off 구간에서 Te가 감소하는 정도를 아래의 식으로 구하였다.

$$y = y_0 + A_0 \exp\left(-\frac{x}{t}\right)$$

여기서 x값은 시간을, y값은 전자온도를 나타낸다. t값은 시간(us)에 대해 Te가 감소하는 정도를 나타내는 변수이며 1kHz에서는 33.619, 5kHz에서는 13.834, 10kHz에서는 10.803의 값을 구할 수 있다.

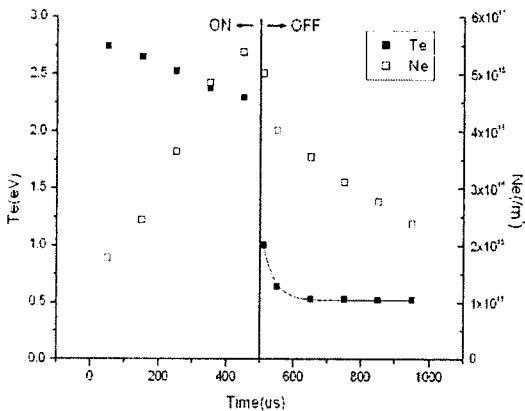


Fig. 6. 1kHz pulse modulation한 플라즈마의 Ne-Te 곡선

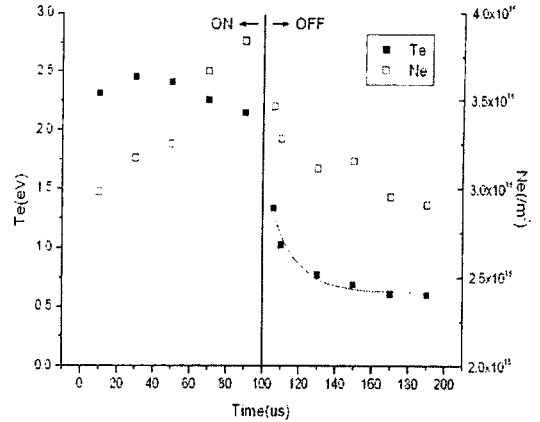


Fig. 7. 5kHz pulse modulation한 플라즈마의 Ne-Te 곡선

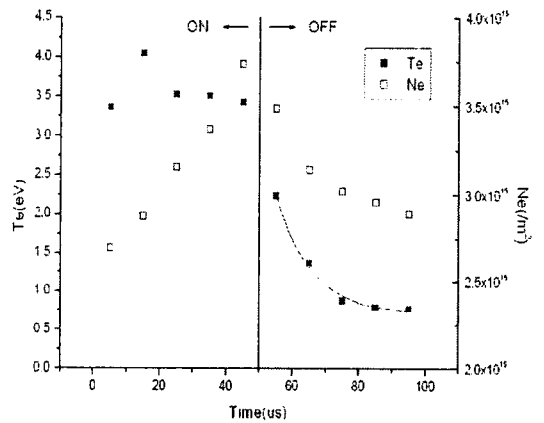


Fig. 8. 10kHz pulse modulation한 플라즈마의 Ne-Te 곡선

3. 결 론

13.56MHz의 RF 전원을 1, 5, 10kHz로 pulse modulation하여 발생시킨 플라즈마를 Langmuir probe를 이용하여 V-I 곡선, V-lnI 곡선, 전자온도와 밀도를 구하였다. 1, 5, 10kHz 모든 주파수에서 전자온도와 밀도가 off 부분에서 서서히 감소하는 영역을 확인할 수 있었다. 즉, off 부분에서 감소하는 영역을 이용한다면 전원을 pulse modulation함으로써 전자의 온도의 밀도를 제어할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 林泉 "플라즈마 공학", 朝倉書店, 1987
- [2] I. Langmuir and H.M. Mott Smith, Gen. Elec. Rev., 27, 1924
- [3] 성열문, "RFTS 이온 플레이팅 시스템의 방전특성과 그 응용에 관한 연구", 박사학위 논문, 부산대학교, 1996
- [4] M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Material Processing", John Wiley & Sons inc, 1994