

Time-dependent Characteristics of Pulse Modulated rf Plasma

李 宣 鴻* · 朴 正 后** · 李 昞 駿†
 (Sun-Hong Lee · Chung-Hoo Park · Ho-Jun Lee)

Abstract - Pulse modulation technique provide additional controlling method for electron temperature and density in rf and microwave processing plasma. Transient characteristics of electron density and temperature have been measured in pulse modulated rf inductively coupled argon plasma using simple probe circuit. Electron temperature relaxation is clearly identified in the after glow stage. Controllability of average electron temperature and density depends on the modulation frequency and duty ratio. Numerical calculation of time-dependent electron density and temperature have been performed based on the global model. It has been shown that simple langmuir probe measurement method used for continuous plasma is also applicable to time-dependent measurement of pulse modulated plasma.

Key Words : Pulse Modulated Plasma, Global Model, Transient Characteristics, Electron Density, Electron Temperature

1. 서 론

19세기 초에 직류 아크방전이 처음 시도된 이후로 산업의 발달과 더불어 플라즈마에 대한 연구는 광원 및 디스플레이 소자로의 응용에서부터 핵융합로, 신물질의 합성, 박막 증착, 오염물 처리에까지 그 응용 범위가 매우 넓다. 그중에서도 특히 저온 플라즈마를 이용한 재료공정 분야는 정보화 사회의 기반기술로서 그 중요성이 점점 부각되고 있는 추세이다. 저온 플라즈마 장치는 두 개의 전극 사이에 수십 MHz에 이르는 라디오 주파수 전압을 인가하는 다이오드 형태의 용량 결합형 플라즈마가 주종을 이루었으나, 최근 ECR 플라즈마, 헬리콘 플라즈마, 유도 결합 플라즈마, 전자빔 여기 플라즈마 등 여러가지 형태의 저압 고밀도 플라즈마 소스들이 제안되어 공정에 적용되고 있다.

장치 개발의 비약적인 발전에도 불구하고, 공정에서 요구되는 조건이 점점 엄격해 짐에 따라 플라즈마 특성제어에 대한 필요성은 여전히 중요한 과제가 되고 있다. 플라즈마 반응기 내에서의 증착이나 식각 반응의 과정은 플라즈마 내부의 다양한 중성 화학종들 및 이온과 기관과의 상호작용에 의해 진행되므로 이온 및 중성 활성종의 종류, 밀도, 에너지 등이 해당 공정의 직접적인 변수가 된다. 이러한 변수들의 특성을 일차적으로 결정짓는 요소는 전자 온도, 밀도라 할 수 있다. 전자밀도는 반응기로 도입되는 전력량에 의해서 주로 결정이 된다. 전자온도는 중성종들의 해리과정에 매우 중요

한 요소이며 프로세스의 특성에 무엇보다 중요한 변수이다. 따라서 외부에서 조절가능한 공정변수로서 독립적인 전자온도 제어의 필요성이 크다. 그러나 통상적인 공정변수 중 전자온도에 직접적인 영향을 줄 수 있는 것은 공정압력 뿐이며 이 또한 독립적인 온도제어는 가능하지 않다. 또 다른 방법 들로는 이온화 에너지가 다른 불활성 기체의 사용, 에너지 조절이 가능한 외부전자빔 소스의 도입 등이 있다.[1] 이러한 방법들은 나름대로의 장점이 있으나 추가적인 장치가 필요하다. 고주파 플라즈마의 운전을 수 - 수십 KHz의 주파수로 단속하는 pulse modulation 방법은 공정압력과는 독립적으로 평균적인 전자온도 조절이 가능하여 반응기내의 plasma chemistry를 제어하는 추가적인 공정변수로 활용할 수 있다. Pulse modulation을 통하여 플라즈마의 재료공정 응용 프로세스를 최적화하기 위해서는 주어진 중성가스종류, 압력조건, 투입전력하에서 전자온도 및 밀도변화 추이를 예측하고 측정하는 일이 무엇보다 중요하다. 본 논문에서는 이러한 필요성에 따라 우선 가장 간단한 불활성기체인 Ar 플라즈마를 대상으로 global modeling[2,3,4,5,6]을 통한 모듈레이션 플라즈마의 온도 밀도를 시뮬레이션 하여 변화 양상을 조사하였다. 또한 boxcar averager와 같은 값비싼 장비 없이 연속 플라즈마의 특성 측정에 사용되는 간단한 측정시스템을 제작하여 펄스 모듈레이션된 고주파 유도결합 플라즈마에서 전자온도 밀도의 시간에 따른 변화를 측정하고 이를 계산결과와 비교 해 보았다.

2. Global Modeling

플라즈마내의 전자 온도와 밀도는 입자, 운동량 및 에너지 보존방정식에서부터 구해질 수 있다. global model은 운동량 보존 방정식을 풀지 않고 플라즈마의 준중성 성질과 Bohm velocity를 통해, 입자들의 손실 플럭스를 플라즈마 경계부에

† 교신저자, 正會員 : 釜山大 工大 電氣工學科 助教授
 E-mail : hedo@pusan.ac.kr
 * 學生會員 : 釜山大 工大 電氣工學科 碩士課程
 ** 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 教授
 接受日字 : 2004年 7月 23日
 最終完了 : 2004年 9月 20日

서 적분함으로서 용기 내 전자밀도를 0 차원적으로 간략화하여 해석하는 방법이다. 이러한 해석 기법은 당연히 반응기 내의 온도, 밀도 분포에 대한 정보를 줄 수 없으나 외부 공정 변수변화에 따른 이들의 전체적인 경향을 파악하는 데는 매우 유용한 도구라 할 수 있다.

중성 플라즈마에서 전자(또는 이온)의 입자보존 방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = G_e + L_e$$

Γ_e , G_e , L_e 는 각각 입자의 플럭스, 생성률 및 손실률이다.

생성률은 전자밀도 n_e , 중성기체밀도 n_g 및 ionization rate coefficient K_{iz} 의 함수이며 $K_{iz}n_en_g$ 로 주어진다. 플라즈마 벌크내에서의 손실은 주로 재결합에 의한 것으로서 $\alpha n_en_i \approx \alpha n_e^2$ 와 같다. 플라즈마 벌크에서 외부로 유출되는 총 플럭스 손실률은

$$n_e u_B \frac{(2\pi R^2 h_R + 2\pi R l h_l)}{\pi R^2 l}$$

과 같이 나타낼 수 있다. R , l 은 각각 원통형 용기의 반경과 길이이며 h_R 및 h_l 은 플라즈마 중심부의 전자 밀도와 sheath 경계에서의 밀도비로서 Godyak 의 해석식 에서부터 다음과 같이 주어진다.[2]

$$h_l \equiv \frac{n_{sl}}{n_0} \approx 0.86 \left(3 + \frac{l}{2\lambda_i}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$h_R \equiv \frac{n_{sR}}{n_0} \approx 0.80 \left(4 + \frac{R}{\lambda_i}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

여기서 λ_i 는 이온의 mean free path 이다. 이 파라메타들은 결국 effective loss area를 결정짓는 요소가 된다. u_B 는 Bohm velocity로서 전자온도와 이온질량의 함수이며 아래의 식으로 표시된다.

$$u_B = \left(\frac{kT_e}{M}\right)^{\frac{1}{2}}$$

플럭스 손실률은 d_{eff} 와 Γ_e 를 각각 $d_{eff} = \frac{1}{2} \frac{Rl}{Rh_l + lh_R}$, $\Gamma_e = n_e u_B$ 와 같이 정의 하면 $\frac{\Gamma_e}{d_{eff}}$ 로 쓸 수 있다.

위에서 고려된 표면에서 적분화 된 플럭스 손실을 고려하면 주어진 입자 보존식은 아래의 0차원 상미분 방정식으로 표현 된다.

$$\frac{dn_e}{dt} = K_{iz}n_en_g - 2n_e \left(\frac{kT_e}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_R}{l} + \frac{h_l}{R}\right) - \alpha n_e^2 \quad (1)$$

또한 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2}n_e kT_e\right) + \nabla \cdot \left(\frac{3}{2}n_e kT_e u_e\right) + n_e kT_e \nabla \cdot u_e + \nabla \cdot (-\sigma_T \nabla kT_e) = P_{abs} + P_{coll}$$

여기서 σ_T , P_{abs} , P_{coll} , 은 각각 플라즈마의 열전도도, 흡수전력, 충돌에 의한 에너지 손실율을 나타낸다. 대류성 열 플럭스 손실의 적분형은 이온에너지 플럭스 손실을 $\frac{\Gamma_e}{d_{eff}} \left(eV_s + \frac{kT_e}{2}\right)$ 및 Maxwellian 분포를 하는 전자에너지 플럭스 손실을 $\frac{\Gamma_e}{d_{eff}} (2kT_e)$ 으로 나누어진다. 여기서 sheath potential V_s 는 다음과 같다.

$$V_s = \frac{kT_e}{2} \ln \left(\frac{M}{2\pi m}\right)$$

플라즈마 벌크내 에서의 ionization 및 excitation등의 비탄성 충돌 손실과 전자-중성입자간의 탄성충돌 손실은 아래의 식으로 표현된다. ϵ_{iz} 및 ϵ_{ex} 는 이온화 에너지, 여기에너지로서 각각의 사건 발생시 전자가 잃는 에너지가 된다.

$$n_en_g (K_{iz}\epsilon_{iz} + K_{ex}\epsilon_{ex} + K_{el}\frac{3m_e}{M}kT_e)$$

재결합에 의한 전자의 에너지 손실은 $\alpha \frac{3}{2}kT_en_e^2$ 이 된다.

플라즈마의 수축, 팽창으로 인한 가열 또는 냉각을 무시하고 전도성 열손실이 대류성 열손실에 비해 작다고 가정하면 주어진 에너지 보존식은 전자온도에 대하여 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{3}{2} \frac{d}{dt} (kT_e) = \frac{P_{abs}(t)}{n_e V} - \frac{3}{2} kT_e (K_{iz}n_g - 2 \left(\frac{kT_e}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_R}{l} + \frac{h_l}{R}\right) - \alpha n_e) - n_e (K_{iz}\epsilon_{iz} + K_{ex}\epsilon_{ex} + K_{el}\frac{3m_e}{M}kT_e) - 2 \left(\frac{kT_e}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_R}{l} + \frac{h_l}{R}\right) \left(e\frac{kT_e}{2} \ln \left(\frac{M}{2\pi m}\right) + \frac{5kT_e}{2}\right) - \alpha \frac{3}{2} kT_en_e \quad (2)$$

식(1)과 (2) 두개의 방정식은 4차 Runge Kutta방법으로 해가 구해 졌다. 계산에 사용된 각종 rate constant 및 관련 파라메타는 아래의 표에 정리하였다.

표 1. 계산에 사용된 rate coefficient(K_{iz} , 및 K_{ex} 는 전자온도 1-10 eV 사이의 값을 fitting 한 결과임)

Table 1. Rate coefficients used in simulation

항목	사용값	참고문헌
α	$7.435 \times 10^{-17} (kT/e)^{-3/4} \text{m}^3/\text{s}$	7,8
λ_i	$1/n_g 10^{-18} \text{m}$	2
K_{iz}	$1.26 \times 10^{-13} \exp(-21.13e/kT)$	2
K_{ex}	$5.89 \times 10^{-14} \exp(-15.97e/kT)$	2
K_{el}	$10^{-13} \text{m}^3/\text{s}$	2
ϵ_{iz}	15.9eV	7
ϵ_{ex}	11.6eV	7

3. Global modeling 계산결과

3-1 연속모드

반경과 길이가 각각 0.115m, 0.6m 인 원통형 챔버에서 Ar 플라즈마를 대상으로 계산을 수행 하였다. 그림 1과 2는 연속모드에서 전자온도, 밀도의 압력 및 입력전력에 따른 변화를 보여준다. 압력에 따른 전자밀도의 경향은 중성기체밀도의 증가에 따른 생성률증가 부분과 온도감소로 인한 ionization rate coefficient의 감소부분의 경쟁관계에서 결정이 되는데 본 결과에서는 압력에 따라 전자온도가 단조 증가하는 경향을 보여준다. 따라서 이 조건에서는 생성항 $K_{iz}n_e n_g$ 에서 n_g 증가의 영향이 더 중요한 요소임을 알 수 있다. 비선형 손실항인 radiation recombination loss는 glow 상태에서 flux loss 항에 비해 무시할 수 있는 수준이다. 압력에 따른 전자온도 감소는 프로세싱 플라즈마의 전형적인 경향성으로서 탄성, 비탄성 충돌률의 증가 때문이다. 투입전력에 따른 경향성은 재 결합항이 거의 무시할 수 있는 수준이므로 밀도는 선형적으로 증가하고 온도는 전력에 무관한 특성을 보여준다.

3-2 Afterglow에서 밀도감소 및 온도 relaxation

펄스모드에 있어서 가장 중요한 것은 서론에서 밝힌 바와 같이 전자온도 및 밀도의 조절가능성이다. 전자밀도는 연속

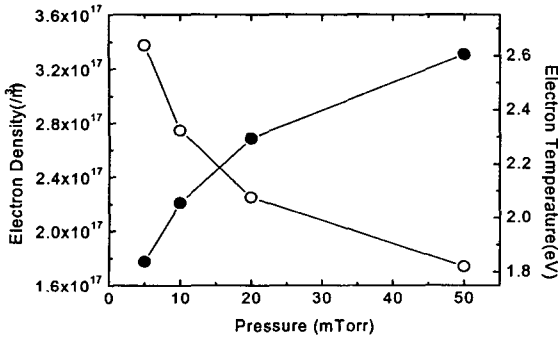


그림 1. 연속모드에서 전자온도 밀도의 압력의존성 (입력전력 300W)

Fig. 1 Electron temperature and density as a function of pressure for continuous mode(300W)

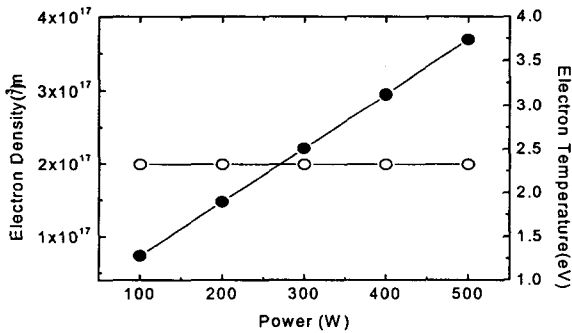


그림 2. 연속모드에서 전자온도 밀도의 입력전력 의존성 (압력 10mTorr)

Fig. 2 Electron temperature and density as a function of power for continuous mode(Pressure 10mTorr)

모드 계산에서 보듯이 투입 전력으로 쉽게 조절이 되지만 전자온도의 독립적인 조절은 불가능 하므로 펄스운전을 통해 전자온도를 어느 정도까지 조절할 수 있는지에 대한 정보가 중요하다. 이 때 기본이 되는 파라메타는 afterglow에서 전자온도밀도의 relaxation 특성이라 할 수 있다.

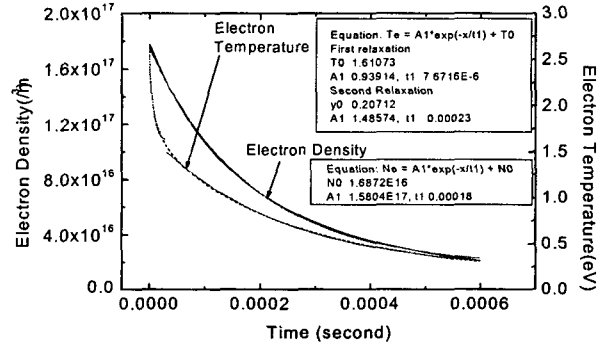


그림 3. 전자온도 밀도의 decay 특성(5mTorr, 300W)

Fig. 3 Decay characteristics of electron temperature and density(5mTorr, 300W)

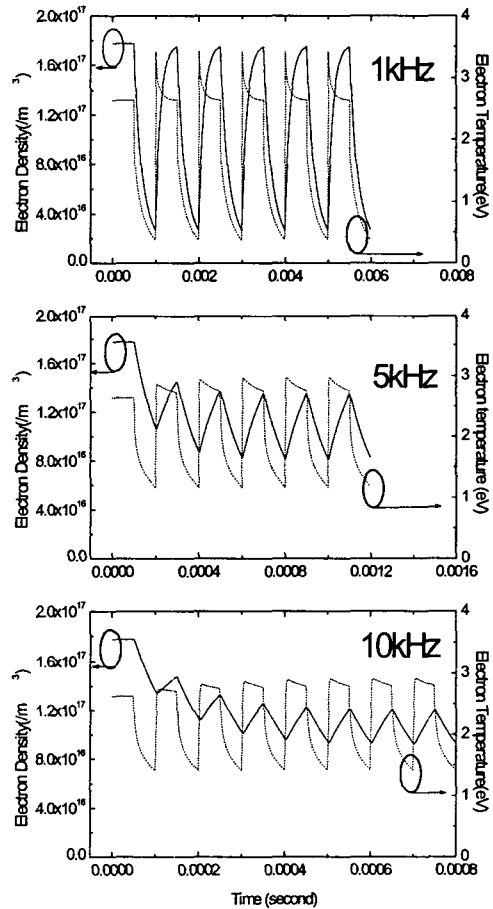


그림 4. Modulation 주파수에 따른 전자온도 밀도 변화

Fig. 4 Time-dependent electron temperature and density for different modulation frequencies

그림 3과 4는 300W, 5mTorr 조건의 방전에서 power off 후 600 μ sec까지의 전자밀도 및 온도의 decay 특성을 보여준다. 밀도감소 경향은 시정수 180 μ sec을 가지는 1차 지수함수로 잘 근사되었다. 전자온도는 초기 급격한 감소 부분과 이후 비교적 느린 감소 추이를 보여 준다.

이들의 시정수는 각각 8 μ sec, 230 μ sec 정도로 나타났다. 초기 급격한 온도 감소는 식(2)의 에너지 보존식에서 보듯이 입자손실과 동반되는 에너지 손실이 온도에 비례하고 초기 높은 온도로 인해 비탄성 충돌에 의한 손실이 크기 때문이다. 이 감쇄 시정수는 펄스 운전에서 모뮬레이션 주파수 결정의 지표라 할 수 있다. 계산결과로 볼 때 모뮬레이션 주파수는 1-10KHz 정도가 효과적일 것으로 판단된다.

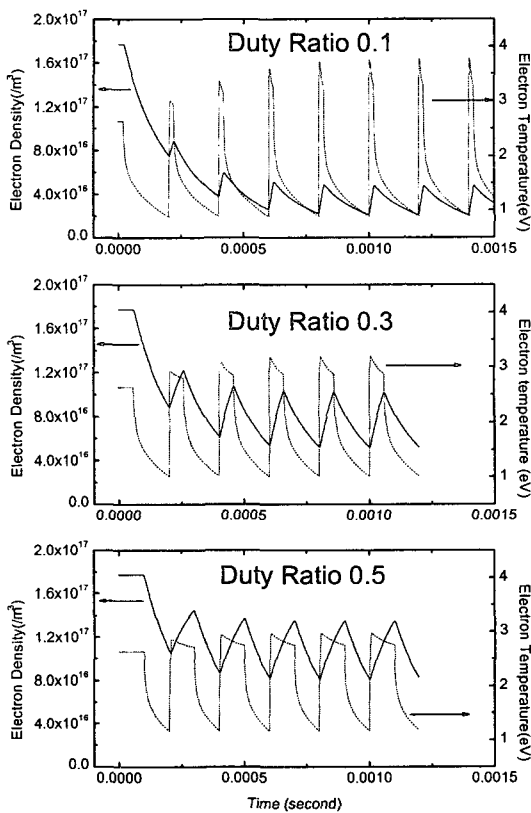


그림 5. Duty 비에 따른 전자온도 밀도 변화
 Fig. 5 Time-dependent electron temperature and density for different duty ratios

3-3 펄스 모뮬레이션 모드

그림 4는 1, 5, 10KHz에 있어서 duty ratio 0.5의 경우 펄스모드에서의 전자온도 및 밀도 변화 계산결과이다. 1KHz pulse 운전의 경우 ON 주기에서의 peak 전자밀도가 연속모드에서의 값을 거의 회복하고 있다, 전자온도의 경우는 ON 초기 밀도가 낮은 경우 높은 침투치를 보여주고 있다. 이는 일정 전력이 투입되는 상황에서 밀도가 낮아 전자당 투입되는 에너지의 비율이 커지지 때문이다. 그러나 실제 고주파 또는 초고주파 전계를 사용하는 프로세싱 플라즈마의 운전에서 전자 밀도에 따라 임피던스 매칭 특성이 달라 지므로 ON 초기 피크 형태의 전자온도 변화 양상은 실제 실험을

통해 검증해 볼 필요가 있다. 주파수가 증가할수록 transient 상태의 영향이 증대되어 온도, 밀도의 변동폭과 peak 값이 감소함을 알 수 있다. 그림 5는 5KHz modulation에서 duty ratio에 따른 전자온도 밀도의 순시값을 보여준다.

Power ON 비율이 증가 할수록 평균 밀도의 증가경향이 뚜렷하고 최고값 과 최소값의 편차 또한 평균밀도 증가와 함께 약간 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 전자온도의 경우 duty 비가 증가할수록 최고값 과 최소값 사의의 편차가 감소하고 있으며 평균 전자온도는 상승하고 있다.

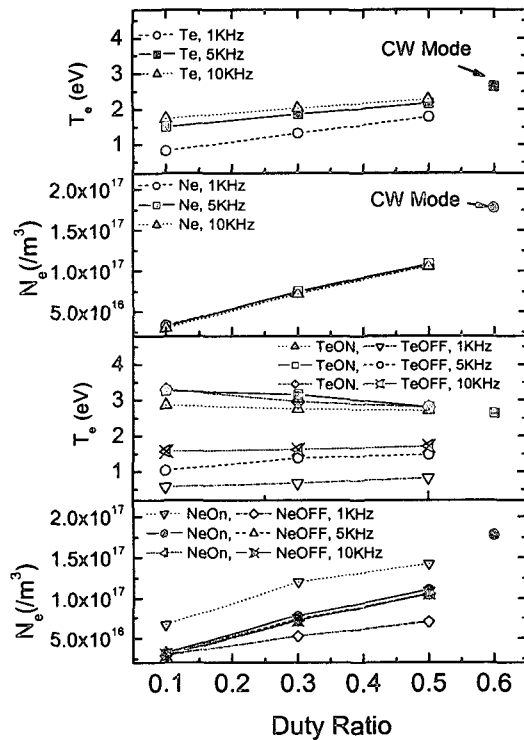


그림 6 전자온도 밀도의 평균값(위로부터 전주기 평균 전자 온도, 전 주기 평균 전자밀도, ON-OFF에서 평균전자 온도, ON-OFF에서 평균전자 밀도)

Fig. 6 Average value of electron temperature and density (From top figure, Electron temperature averaged for whole period, Electron density averaged for whole period, Electron temperature averaged for 'ON' and 'OFF' period, Electron density averaged for 'ON' and 'OFF' period)

그림 6은 1, 5, 10KHz 의 모뮬레이션 주파수에 대해 ON, OFF 상태의 평균 전자온도 밀도 및 전주기 평균값을 나타낸 것이다. 참고적으로 연속모드의 값을 같이 표기하였다. 전주기 평균 온도, 밀도는 duty의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있고 모뮬레이션 주파수가 상승할 수록 높은 평균전자온도 값을 보여준다. 이것은 전자온도의 relaxation 시간이 매우 짧기 때문이다. 반면에 비교적 긴 decay 시정수를 가지는 밀도의 경우 duty 비에 따라 평균값은 선형적으로 상승하는 반면 주파수 의존성은 크지 않았다. 주파수가 증가할 수록 ON, OFF 시점에서의 평균값 차이가 감소하고 있으며

ON 영역의 평균 전자온도는 duty 증가에 따라 약간 감소 하는 경향을 보여준다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 ON 초기 낮은 밀도의 영향에 의한 결과이다.

4. Pulse mode plasma 시변특성측정

유도결합 플라즈마 소스의 pulse mode 운전에서 시변 전자온도 밀도의 측정이 이루어졌다. 그림 7은 실험에 사용된 고주파 유도 결합플라즈마 및 측정 시스템의 개략도를 보여준다. 전자 온도 밀도의 측정은 quartz tube의 끝단부에서 이루어졌다.

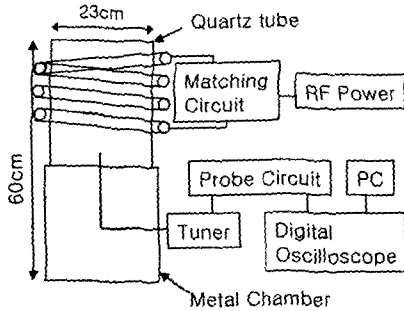


그림 7 실험장치의 개략도
Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

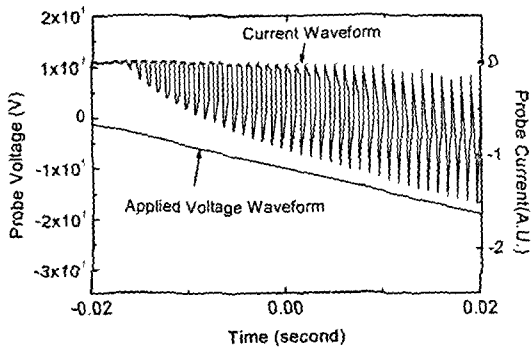


그림 8 인가된 probe 전압파형과 그에 따른 전류특성
Fig. 8 Applied probe voltage and measured current waveform

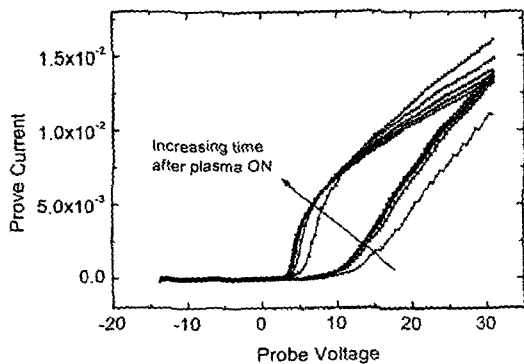


그림 9 시간별로 정리된 Probe 전류전압 특성
Fig. 9. Probe Current-Voltage characteristics for different relative times after plasma ON

통상적인 Langmuir Probe에 modulation 주파수보다 매우 낮은 주파수의 Ramp 전압을 인가하여 얻어진 I-V 특성을 펄스파의 특정 위상에 따라 샘플링 함으로서 시변특성을 추출하였다. 그림 8은 Probe에 인가한 전압 파형과 펄스모드에서 얻어진 전류파형의 일부를 확대하여 나타낸 그림이다. 플라즈마의 ON, OFF 에 따라 전류특성이 변화 하고 있음을 볼 수 있다.

이 측정 Data를 위상별로 재정리 하여 그림 9과 같은 I-V 특성곡선을 얻을 수 있었다. 플라즈마 운전조건은 Ar 15sccm, 압력 10mTorr, 입력전력 300W이었다.

그림 10과 11은 I-V 특성으로부터 얻어진 모듈레이션 주파수 1KHz 및 5KHz duty ratio 0.5 에서의 전자온도 밀도의 시변 특성이다. 실선과 점선으로 표시된 곡선은 이 조건에서 global 모델에 의해 계산된 온도밀도 변화이다.

측정값과 global 모델로 구해진 값은 정성적으로 매우 잘 일치 하는 것을 볼 수 있다. 온도나 밀도의 절대값 차이는 계산모델자체가 공간분포를 고려치 못하는 점과 실제 실험에서 측정된 입력전력이 100% 플라즈마로 투입되는 것이 아니다. 이러한 요소들이 의해 계산된 밀도값과 실험치의 차이가 발생한다.

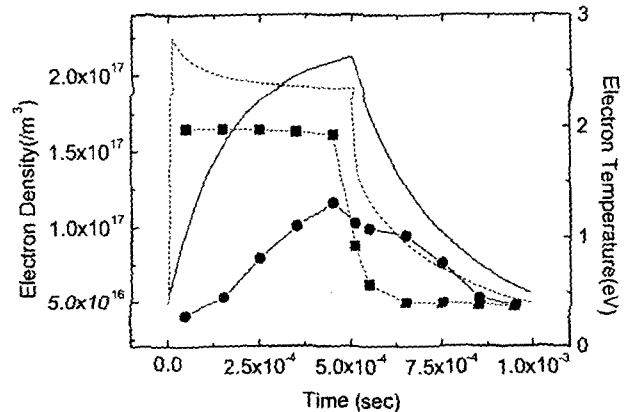


그림 10. 10mTorr, 300W조건에서 측정된 시변 전자온도 밀도 특성과 시뮬레이션 결과 (Modulation frequency 1KHz, duty ratio 0.5)

Fig. 10 Measured time-dependent electron temperature and density compared with simulation results (Modulation frequency 1KHz, duty ratio 0.5)

Afterglow에서 온도 측정결과를 보면 초기 급격한 감소이후의 relaxation 이 계산치보다 더 큼을 확인할 수 있다. 이것은 global model이 낮은 전자온도영역에서 energy relaxation 을 고려하기에 불충분한 부분이 있음을 보여준다. 또한 플라즈마 on, off 경계부분에서 전자밀도 측정값이 인접시간대에 비해 경향성 이탈이 보이는 것은 경계의 급격한 data 값의 변화로 인해 시간대 별로 추출해낸 I-V 값의 정확도가 떨어진 것에 기인하는 것으로서 이 부분에 대한 실험의 정확도 향상이 필요한 것으로 판단된다.

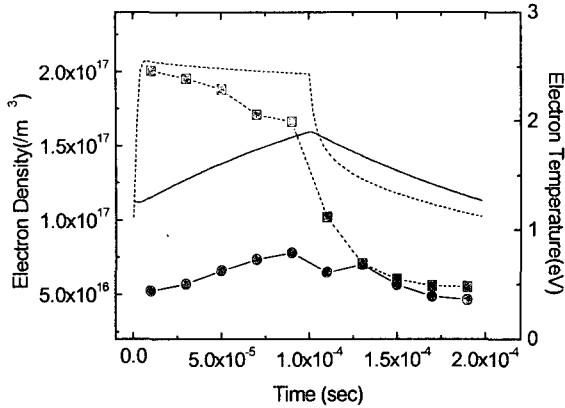


그림 11. 10mTorr, 300W조건에서 측정된 시변 전자온도 밀도 특성과 시뮬레이션 결과 (Modulation frequency 5KHz, duty ratio 0.5)

Fig. 11 Measured time-dependent electron temperature and density compared with simulation results (Modulation frequency 5KHz, duty ratio 0.5)

4. 결 론

프로세싱 플라즈마의 펄스 modulation 특성을 알아보기 위하여 global model을 이용한 0차원 시뮬레이션과 고주파 유도 결합 플라즈마에서 Langmuir Probe 실험이 수행되었다. 시변항을 고려한 0차원 시뮬레이션이 펄스 운전모드의 플라즈마 특성을 예측하는데 매우 효과적인 도구임을 알 수 있었고 정성적으로 실험결과와 매우 잘 일치하였다. 모뮬레이션 주파수와 duty ratio는 압력, 입력전력에 대하여 효과적인 플라즈마 제어수단이 됨을 알 수 있었다. 이 결과는 추후 진행될 활성종의 제어와 플라즈마 공정의 고도화를 위한 기초 Data로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역혁신인력양성사업의 연구 결과물입니다.

참 고 문 헌

[1] H. J. Lee M. Motomura, K. Tachibana "Observations of Silicon Surfaces Exposed to Inductively Coupled CHF3 and C4F8/H2 Plasmas Using Fourier Transform Infrared Ellipsometry" Jpn. J. Appl. Phys. Vol.37 Part 1, No. 8 pp. 4522-4526 1998.
 [2] M. A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", John Wiley & Sons, Inc, Chap. 10 1994.
 [3] S. Ashida, C. Lee and M.A. Lieberman, "Spatially averaged model of time modulated high density argon

plasmas", J. Vac. Sci. Technol. A 13(5) pp. 2498-2507, 1995.

[4] M. A. Lieberman and S. Ashida, "Global models of pulse-power-modulated high-density, low-pressure discharge", Plasma sources Sci. Technol. 5, pp. 145-158, 1996.
 [5] H. J. Lee and J. K. Lee, "Time-dependent global-model simulation for a pseudospark discharge with a cylindrical hollow cathode", Jpn. J. Phys., Vol. 35, Part 1, No. 12A, pp. 6253-6258, 1996
 [6] Y. Ikeda, J. P. Verboncoeur, P. J. Christenson, C. K. Birdsall, "Global modeling of dielectric barrier discharge in Ne-Xe mixtures for an alternating current plasma display panel", J. Appl. Phys. Vol. 86, No. 5, pp. 2431-2441, 1999.
 [7] Sanborn C. Brown "Basic Data of Plasma Physics", AIP Press, 1993.
 [8] Yuri P. Raizer "Gas Discharge Physics", Springer-Verlag, 1991.

저 자 소 개



이 선 홍(李宣鴻)

1977년 7월 12일생, 2002년 부산대학교 전기전자통신공학부 졸업, 현재 전기공학과 대학원 재학중



박 정 후(朴正后)

1974 부산대학교 석사, 1983 Kyushu대 공학박사, 현 부산대학교 전기공학과 교수, 관심분야는 플라즈마 디스플레이 및 플라즈마 응용



이 호 준(李昉駿)

1996 서울대학교 공학박사, 1996-1998 Kyoto대 강사, 1999-2001 위덕대학교 전임강사, 현 부산대학교 조교수, 관심분야 플라즈마응용, 플라즈마 디스플레이 RF, Microwave 응용