

간단한 RF 보상 정전탐침법을 이용한 유도결합형 플라즈마 특성 연구

김윤기, 위성석, 김태환, 김동현, 이해준, 이호준
부산대학교 전자전기공학과*

A Study on the Characteristics of Inductively Coupled Plasma Using Simple RF Compensated Langmuir Probe

Yun-Gi Kim, Sung-Suk Wi, Tae-Hwan Kim, Dong-Hyun Kim, Hae June Lee, Ho-Jun Lee
Department of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract - 플라즈마 변수를 측정하기 위한 가장 일반적인 방법은 정전탐침(Langmuir Probe)을 이용하는 것이다. 정전탐침은 RF 플라즈마 내에 삽입될 경우 탐침의 전위가 플라즈마 전위에 의해 진동하여 탐침 전류의 왜곡이 발생하여 정확한 플라즈마 변수 측정이 어렵다. 탐침 전위의 변동을 최소화하기 위해 임피던스가 큰 인덕터를 탐침 회로 내에 삽입한다. 본 연구에서는 자기 공명 주파수가 13.56MHz 근방의 인덕터 3 종류를 선정하여 간단한 RF 보상 정전탐침을 제작하여 유도결합형 플라즈마의 특성을 측정하였다. RF 보상 정전탐침에 의해 구해진 플라즈마의 전자 온도 및 플라즈마 전위는 감소하며, 플라즈마의 전자 밀도는 증가함을 알 수 있었다.

1. 서 론

플라즈마를 측정하기 위한 모든 방법 중에 정전탐침(Langmuir Probe)은 구조가 가장 간단하고 제작이 쉬운 장치이다. 정전탐침은 플라즈마 내부에 금속 탐침을 직접 삽입하여 전압을 인가하고, 그에 따른 전류를 측정하여 플라즈마 변수를 계산한다. 정전탐침에 의해 측정되는 전류-전압 특성으로부터 전자온도, 이온 및 전자 밀도, 부유 전위, 시평균 플라즈마 전위를 구할 수 있다.

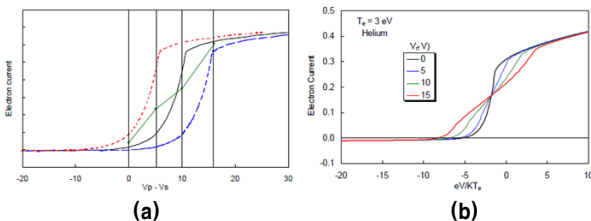
현재 정전탐침이 가장 널리 사용되는 분야는 반도체 산업이며 재료의 식각과 증착 등에 사용되는 플라즈마 변수를 측정하기 위해 주로 사용된다. 이때 플라즈마는 주로 RF(Radio Frequency) 전력에 의해 생성된다. RF로 구동되는 플라즈마를 정전탐침으로 측정하는 경우 탐침의 전위가 플라즈마 전위에 의해 진동하여 측정되는 전류-전압 특성에 왜곡이 발생한다. RF 효과를 줄이기 위한 다양한 연구 결과가 발표되었으며, 그 중 하나는 초코코일(인덕터)을 탐침 내부에 삽입하는 방법이다.

본 연구에서는 정전탐침을 사용하여 유도결합형 플라즈마의 특성을 측정하였다. RF 보상되지 않은 정전탐침과 초코코일을 삽입한 RF 보상 정전탐침을 사용하여 유도결합 플라즈마의 플라즈마 전위, 전자 온도 및 밀도를 측정하여 비교하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 방법

2.1.1 RF 보상 정전탐침



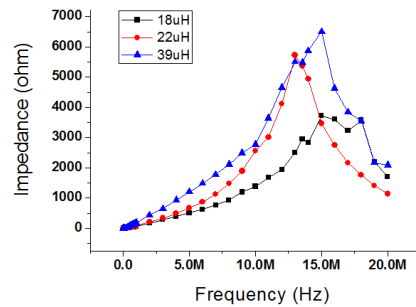
〈그림 1〉 전압 진동에 따른 측정 전류 변화와 다양한 크기의 V_0 진동에 대한 전류-전압 특성 곡선^[1]

정전탐침에 의해 구해지는 전류-전압 특성에서 전압(V)은 탐침에 인가되는 DC 전위(V_p)와 RF에 의해 진동하는 전위(V_0)의 차를 의미한다. V_0 가 진동할 때 측정 전류의 변화를 〈그림 1〉(a)에서 나타내었다. 중앙의 검은 실선은 플라즈마의 정확한 전류-전압 특성 곡선이며, 양쪽의 실선은 V_0 가 일정 크기로 진동했을 경우 특성 곡선을 나타낸다. 두 개의 실선의 평균값을 보여주는 곡선이 중앙의 초록색 선이며, RF로 진동하는 전위에 의해 측정 전류의 오차를 보여주고 있다. 〈그림 2〉(b)에서는 V_0 의 진동 크기 변화에 따른 전류-전압 특성 곡선의 변화를 나타내고 있다. RF 진동 전위에 의해 전류-전압 특성 곡선은 보다 넓어지고, 이로 인해 전자 온도는 실제보다 높게 측정되며 부유 전위는 보다

음의 값을 나타내게 된다.[1]

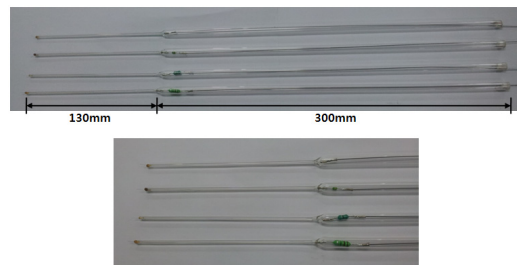
정전탐침의 RF 보상을 위한 가장 일반적인 방법은 높은 임피던스의 인덕터(RF 초코코일)를 이용하는 것이다.[2] 이는 쉬스(플라즈마와 탐침 tip 사이)와 인덕터 사이의 RF 전압 분배 시 인덕터에 큰 전압 강하가 발생하도록 하는 방법이다. 쉬스에 분배되는 전압의 진동이 작아지면 탐침으로 유입되는 전류의 진동도 감소하게 되고, 〈그림 1〉에서 나타난 바와 같이 전류-전압 특성 곡선의 왜곡이 감소하게 된다. 이를 위해 높은 Q-factor를 갖는 자기 공명 인덕터가 주로 사용된다.[3]

본 연구에서는 자기 공명 주파수가 13MHz(18 μ H, 39 μ H)와 14MHz(22 μ H)인 인덕터 3종류를 사용하여 RF 보상 정전탐침을 제작하였다. RF 보상 정전탐침에 사용된 인덕터의 주파수별 임피던스 특성을 평가하기 위해 함수발생기(TDS2012, Tektronix)를 사용하였다. 적용된 모든 인덕터는 RF 영역에서 〈그림 2〉에서와 같이 수k Ω 의 임피던스를 보이고 있다.



〈그림 2〉 RF 보상 정전탐침에 사용된 인덕터의 주파수별 임피던스 특성

본 연구에서 제작된 정전탐침은 〈그림 3〉에 나타내었다. 탐침의 몸체는 유리관을 사용하여 제작하였다. 플라즈마의 왜란을 최소화하기 탐침의 앞부분은 외경 2mm, 길이 130mm의 유리관을 사용하였고, 뒷부분은 인덕터가 삽입될 수 있도록 외경 8mm, 길이 300mm의 유리관을 사용하였다. 유리관 내의 인덕터의 위치는 플라즈마와 인덕터 사이의 거리를 최소화하여 stray capacitance를 줄이기 위하여 가능한 탐침의 앞쪽에 배치하였다.[1] 플라즈마에 노출되는 탐침의 와이어는 직경 100 μ m의 텅스텐을 사용하였고 tip의 길이는 5mm이다.

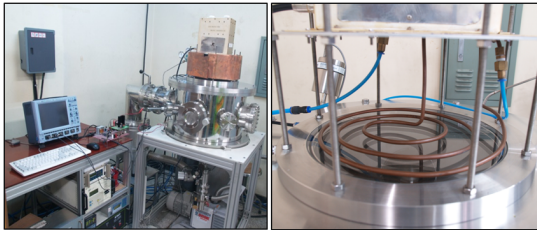


〈그림 3〉 제작된 정전탐침

2.1.2 유도결합형 플라즈마 발생 장치

〈그림 4〉는 본 연구에 사용된 플라즈마 발생 장치이다. 반응용기는 stainless steel(SUS304)로 제작되었으며 내경 \varnothing 540, 높이 360mm의 크기를 갖는 원통 형태이다. 반응용기 상단에 외경 \varnothing 300의 석영창을 설치하고 그 위에 3턴의 spiral 형태 안테나를 설치하여 13.56 MHz의 RF 전력을 인가하였다. 입력 RF 전력은 200~1000W이며 각 입력 전력에 대한

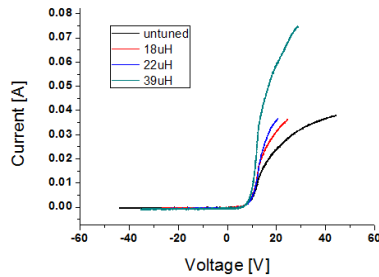
전류-전압 특성 곡선을 측정하여 플라즈마 변수를 구하였다. 반응용기 내부는 터보 분자 펌프를 이용하여 초기 진공도 10^{-6} Torr 이하를 유지하였으며, 플라즈마 발생을 위하여 Ar 가스를 MFC를 통하여 반응용기 내에 유입시켜 10^{-2} Torr의 내부 압력을 유지하도록 하였다.



〈그림 4〉 유도결합형 플라즈마 발생 장치

2.2 실험 결과

〈그림 1〉에서 나타난 바와 같이 RF 플라즈마의 진동에 의해 탐침의 전위가 진동할 때 전류-전압 특성 곡선의 전이영역 기울기가 완만해진다. 〈그림 5〉는 입력 RF 전력이 500W일 때 정전탐침 종류에 따른 전류-전압 특성 곡선이며, 인덕터가 삽입된 RF 보상 정전탐침의 경우 인덕터가 없는 경우보다 전이 영역의 기울기가 증가한다.



〈그림 5〉 정전탐침 종류에 따른 전류-전압 특성 곡선

정전탐침에 의해 얻어지는 전류-전압 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.[4]

$$I_e = \frac{1}{4}en_0\bar{v}_e A \exp\left(\frac{V_B - \Phi_p}{T_e}\right) \quad (1)$$

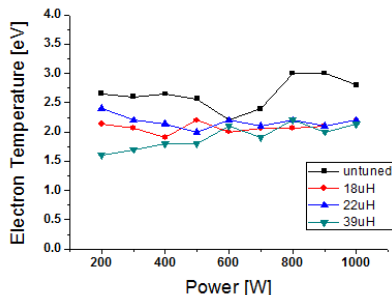
$$I_{esat} = \frac{1}{4}en_0\bar{v}_e A \quad (2)$$

위의 식에서 V_B 는 탐침에 인가되는 전압, Φ_p 는 플라즈마 전위, n_0 는 전자 밀도, A 는 탐침 tip의 면적, \bar{v}_e 는 전자의 평균속도, T_e 는 전자 온도, I_{es} 는 포화 전자전류이다.

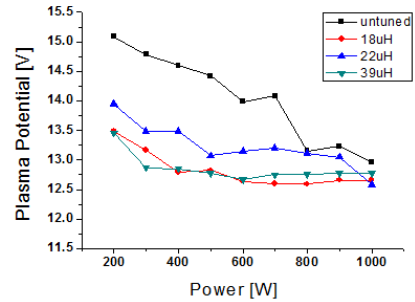
(1)식에서 다음 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\ln\left(\frac{I_e}{I_{esat}}\right) = \frac{V_B - \Phi_p}{T_e} \quad (3)$$

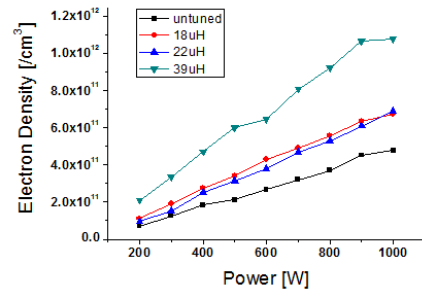
(3)식에서 전자온도 T_e 는 탐침의 전자전류의 로그값과 전압 사이의 기울기의 역수임을 알 수 있다. 따라서 〈그림 5〉에서 인덕터가 삽입된 정전탐침에 의해 얻어지는 전자 온도는 인덕터가 없는 경우에 비해 감소하게 된다. 〈그림 6〉에서는 위의 식들을 이용하여 입력 RF 전력과 정전탐침 종류에 따른 플라즈마의 전자 온도를 나타내고 있다. (3)식을 통해 예상되는 바와 같이 인덕터가 삽입된 정전탐침에 의한 전자 온도는 인덕터가 없는 정전탐침에 의한 전자온도보다 20~40% 낮은 값을 나타낸다. 입력 RF 전력 변화에 따른 유도결합형 플라즈마의 전자 온도는 크게 변화가 없음을 알 수 있다.



〈그림 6〉 입력 RF 전력과 정전탐침 종류에 따른 전자 온도



〈그림 7〉 입력 RF 전력과 정전탐침 종류에 따른 플라즈마 전위



〈그림 8〉 입력 RF 전력과 정전탐침 종류에 따른 전자 밀도

〈그림 7〉은 입력 RF 전력과 정전탐침 종류에 따른 플라즈마 전위를 나타내고 있다. 인덕터가 삽입된 RF 보상 정전탐침의 경우 플라즈마 전위가 감소함을 알 수 있었다. 플라즈마 전위도 전자 온도와 마찬가지로 전류-전압 특성 곡선의 전이 영역의 기울기가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 입력 RF 전력이 증가함에 따라 플라즈마 전위는 감소하는 경향을 보이며, 인덕터가 삽입된 경우 감소폭이 인덕터가 없는 경우에 비해 작다.

〈그림 8〉은 입력 RF 전력과 정전탐침 종류에 따른 전자 밀도를 나타내고 있다. 입력 RF 전력 증가에 따라 유도결합형 플라즈마의 전자 밀도는 증가하는 경향을 보인다. 전류-전압 특성 곡선으로부터 전자 온도, 포화 전류밀도와 플라즈마 전위를 구한 후 (2)식으로부터 전자 밀도를 구할 수 있다. 인덕터를 삽입한 RF 보상 정전탐침의 경우 인덕터가 없는 정전탐침에 비해 높은 전자 밀도를 나타낸다.

3. 결 론

본 연구에서는 유도결합형 플라즈마의 특성 평가를 위해 정전탐침법을 이용하였다. Radio Frequency로 구동되는 유도결합형 플라즈마의 변수의 보다 정확한 측정을 위해 자기 공명 주파수가 13.56MHz 근방의 인덕터를 탐침 내부에 삽입하여 간단한 RF 보상 정전탐침을 제작하였다. 전류-전압 특성 곡선의 전이 영역 기울기는 인덕터가 삽입된 경우 증가하였고, 이에 따라 전자 온도 및 플라즈마 전위는 감소하는 경향을 나타내었다. 전자 밀도는 RF 보상 정전탐침의 경우 보다 높은 값을 얻을 수 있었다. RF로 구동되는 플라즈마를 측정할 때 탐침의 전위 진동을 보상하지 않는 경우 탐침 전류의 왜곡이 발생하여 낮은 전자 밀도, 높은 전자 온도 등의 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

[감사의 글]

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20104010100670)

[참고 문헌]

- [1] Francis F. Chen, "Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics", IEEE-ICOPS meeting, June 5, 2003
- [2] R.R.J. Gagne and A. Cantin, "Investigation of an rf Plasma with Symmetrical and Asymmetrical Electrostatic Probes", J. Appl. Phys., Vol. 43, 2639-2647, 1972
- [3] Isaac D Sudit and Francis F Chen, "RF compensated probes for high-density discharges", Plasma Sources Sci. Technol., 3, 162-168, 1994
- [4] Michael A. Lieberman and Allan J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", (John Wiley & Sons, Inc.), Chap 6, 2005