

창립
40주년학술대회
논문 87-H-20-10

마이크로파를 이용한 플라즈마 발생에 관한 연구

황 기 응, 이 정 해*
서울 대학교 전기 공학과

A study on the generating plasma by microwave

Whang Ki WOONG, Lee Jeong Hae*
Seoul National University Electrical Engineering*

Abstract

A microwave plasma generating system has been designed to study the properties of plasma. A microwave(2.45GHz) generated by the magnetron is transmitted to the cylindrical cavity through the the rectangular wave guide to generate hydrogen plasma. The electron temperature and the plasma density are measured by the Double Langmuir probe. A dielectric such as alumina is heated by the microwave and plasma. The surface temperature varies with the neutral gas pressure.

1. 서론

2.45GHz의 마이크로파를 발생하는 magnetron을 이용하여 TE₀₁ mode의 power가 전달되도록 사각 도파관과 플라즈마가 생성되는 TE₁₁₅, TM₀₁₃의 eigen mode를 갖는 cylindrical cavity를 설계하였다. 이때 발생된 플라즈마의 전자온도와 밀도의 증성기체 압력과 cavity내의 위치에 따른 변화를 Double Langmuir probe를 이용하여 관찰하였다. 또한 플라즈마내에 알루미늄 기판을 넣어 압력에 따른 표면의 온도변화를 optical pyrometer로 측정하였다.

2. 본론

Maxwell Equation 으로부터 (1)식의 형태를 구할 수 있다.

$$\nabla^2 \psi + \gamma^2 \psi = 0 \dots\dots\dots(1)$$

where $\begin{cases} \psi; E_z \text{ or } B_z \\ \gamma^2 = \mu\epsilon\omega^2 - k^2 \end{cases}$

(1)식을 직각좌표계에서 풀면 sine 과 cosine 으로 이루어진 field 를 구할 수 있고, 도파관의 경계조건 으로부터 아래의 (2)식을 얻을 수 있다.

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \dots\dots\dots(2)$$

(2)식으로부터 2.45 GHz 를 TE₀₁ mode 만이 통과 할 수 있는 사각도파관의 크기를 설정하였다. a=2.8 (cm), b=7.8 (cm)

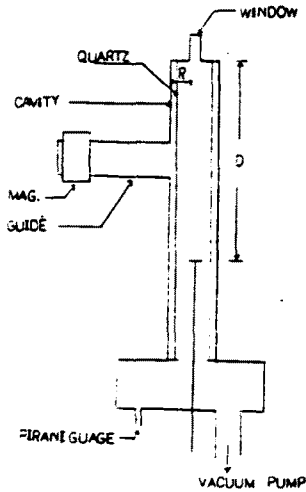
(1)식을 다시 원통좌표계에서 풀면 Bessel 함수로 이루어진 field 를 구할 수 있고, cavity 의 경계 조건으로부터 (3)식을 얻을 수 있다.

$$\omega_{mnp} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{\beta_{mn}'}{r}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \dots\dots\dots(3)$$

where $\begin{cases} \beta_{mn}; n\text{-th zero of } J_m \text{ for TM} \\ \beta_{mn}'; n\text{-th zero of } J_m' \text{ for TE} \end{cases}$

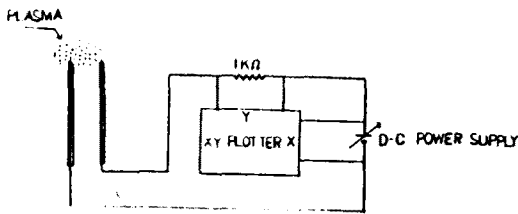
(3)식을 만족하는 eigen-mode 를 갖는 cavity 를 설계하였다. 우리가 제작한 장치에서는 r=5.25 cm 로 고정하고 d를 가변함으로써 TE₁₁₅ (d=40.8 cm) TM₀₁₃ (d=41.9 cm) 의 mode 가 존재할 수 있도록 하였다.

cylindrical cavity 안에는 내경 6.75 cm 의 석영관을 넣어 진공상태를 유지하고 플라즈마를 유도하였다.



(그림.1) System 개략도

진공 pump 로는 rotary pump 와 diffusion pump 로 진공을 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr까지 유지 할 수 있다. System 윗 부분에는 window를 달아서 석영관 내에 있는 플라즈마를 관측할 수 있도록 하였다.



(그림.2) Double Langmuir probe 회로도

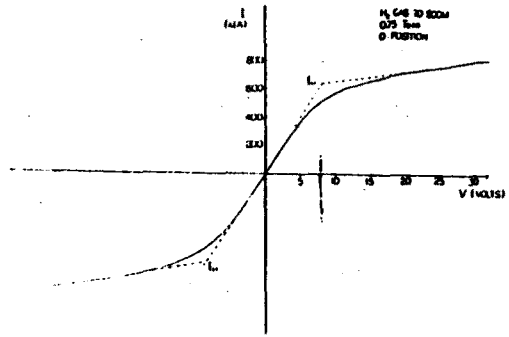
그림2와 같이하여 직류 전압원을 probe 양단에 걸어 줌으로 흐르게 되는 전류를 $1k\Omega$ 저항에 흐르게하여 양단에 걸리는 전압을 측정하여 그림3과 같은 플라즈마의 I - V 특성곡선을 얻는다.

그림3과 같은 곡선으로부터 플라즈마 밀도와 전자 온도를 구하는 것은 다음과 같다.

$$i_{1+} + i_{2+} - i_{1-} - i_{2-} = 0 \quad \dots\dots(4)$$

where $\left\{ \begin{array}{l} i_{1,2+} : \text{probe 1,2에 흐르는 양이온 전류} \\ i_{1,2-} : \text{probe 1,2에 흐르는 전자의 전류} \end{array} \right.$
회로에 흐르는 전자의 전류를 I 라 하면

$$2I = i_{2+} - i_{2-} - (i_{1+} - i_{1-}) \quad \dots\dots(5)$$



(그림.3) I-V 특성 곡선

식 (4), (5)로 부터

$$I = i_{1-} - i_{1+} = i_{2+} - i_{2-} \quad \dots\dots(6)$$

probe 에 흐르는 전자 전류 밀도는

$$i_{1-} = A_1 j_r \exp(eV_1 / kT_e) \quad \dots\dots(7)$$

$$i_{2-} = A_2 j_r \exp(eV_2 / kT_e)$$

where $\left\{ \begin{array}{l} A_1, A_2 : \text{플라즈마에 노출된 probe 의 면적} \\ j_r : \text{random electron density} \end{array} \right.$

식 (6), (7)로 부터

$$\frac{I + i_{1+}}{i_{2+} - I} = \frac{A_1}{A_2} \exp(eV/kT_e) \quad \dots\dots(8)$$

(8)식에서 $dI/dV|_{V=0}$ 를 구하면

$$\frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} = \frac{e}{kT_e} \frac{i_{1+} \cdot i_{2+}}{i_{1+} + i_{2+}} \quad \dots\dots(9)$$

따라서 그림3에서 i_{1+} 와 i_{2+} 를 구하고 (9)식으로 부터 전자의 온도를 구했다.

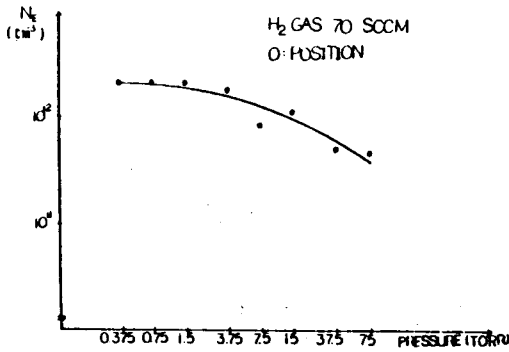
플라즈마 밀도는 $j_+ = N_i e v_+ / 4$ 에서

$$N_i = N_e \approx 4i_{1+} / A_1 e v_+ \quad \dots\dots(10)$$

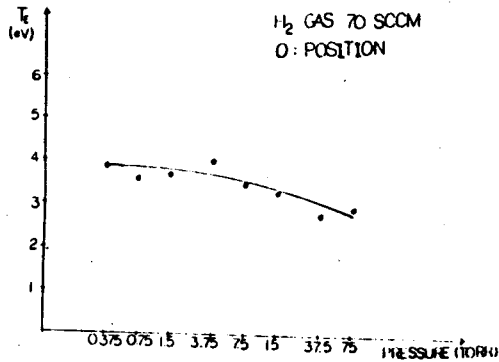
(10)식으로부터 구하였다.

앞에서 설명한 방법으로 수소 기체 70accm 을 석영관으로 유입한 후 플라즈마 밀도와 전자의 온도를 중성기체의 압력에 따라 측정 한 결과를 그림4, 그림5에 나타내었다.

그림4에서 보면 압력이 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 감소함을 볼 수 있고, 그림5에서 보면 압력의 증가에 따라 전자 온도도 감소하는데 이는 중성기체의 압력이 증가함에 따라 중성기체분자와 전자간의 충돌이 활발해지기 때문에 생기는 것으로 생각된다.

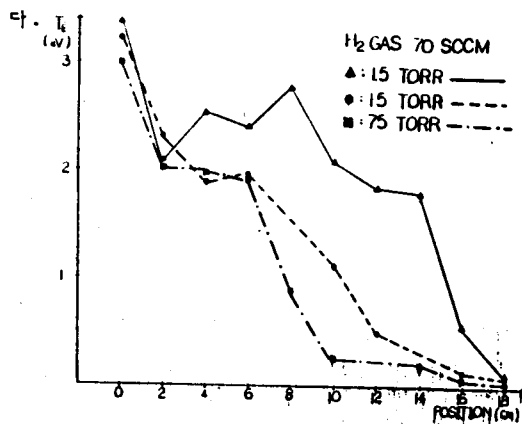


(그림.4) 증성기체 압력에 따른 플라즈마 밀도의 변화

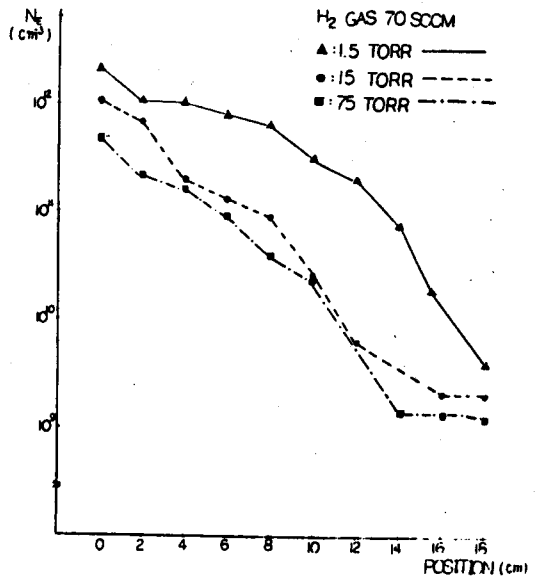


(그림.5) 증성기체 압력에 따른 전자온도의 변화

그림6, 그림7은 cavity 내에 위치에 따른 전자온도와 플라즈마 밀도의 분포인데, 여기서 위치는 도파관과 cavity가 연결되는 증앙부를 원점으로 한 위치를 말한다.



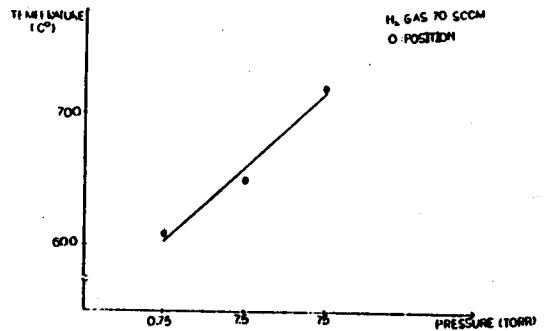
(그림.6) 위치에 따른 전자 온도의 변화



(그림.7) 위치에 따른 플라즈마 밀도 변화

그림6과 그림7에서 보는 바와 같이 증앙부에서 멀어짐에 따라 온도와 밀도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림8은 플라즈마 내에 알루미늄 기판을 넣어 20분 정도 가열한 다음 압력에 따른 온도변화를 optical pyrometer로 측정하였다.



(그림.8) 압력에 따른 알루미늄의 표면 온도 변화

3. 결론

이상에서 우리는 마이크로파를 이용하여 플라즈마를 발생하는 장치를 설계하는 방법과 플라즈마내의 밀도와 온도를 Double Langmuir probe로 측정하였으며, $n_e \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \sim 3 \text{ eV}$ 정도가 얻어졌고, 증성기체 압력

과 위치에 따른 온도, 밀도 변화를 고찰하였다.

또한, 플라즈마내에 있는 알루미늄 기판의 표면온도를 optical pyrometer로 측정하였으며 마이크로파를 인가한 후 약20분 후에 700°C 정도까지 온도가 상승하는 것을 관찰 할 수 있었다.

4. 참고 문헌

- 1) 박 기수, 박 한규, "초고주파 공학"
- 2) J.D. Jackson, "Classical Electrodynamics" 2nd Edition John Wiley & Sons Inc, (1975)
- 3) R.G. Brown, "Lines, waves, and antennas" John Wiley and Sons, (1973)
- 4) "Plasma Diagnostic Techniques" Richard H. Huddlestone & Stanley L. Leonard., (1965)
- 5) Russ A. Morgan, "Plasma Etching in Semiconductor Fabrication" ELSEVIER, (1985)
- 6) E. Nasser, "Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics" John Wiley & Sons Inc, (1971)
- 7) T.H. Stix, "The theory of Plasma waves" McGraw-Hill Book company, (1962)