한국표면공학회지
Journal of the Korean Institute of Surface Engineering
Vol. 27, No. 6, Dec. 1994
<연구논문>

Helicon wave에 의하여 여기된 Ar 플라즈마 특성

김태영, 정기형, 이승학*, 정재국*
서울대학교 원자핵공학과, *중앙대학교 물리학과

Characteristics of Ar Plasma Excited by Helicon Wave

T. Y. Kim, K. H. Jung, S. H. Lee*, and J. K. Jung*
Department of Nuclear engineering, Seoul National University, Seoul 151-742
*Department of Physics, Chung Ang University, Seoul 150-756

Abstract

This work concerns a research for helicon wave plasma generators with applications to materials processing. For this end, helicon wave plasma source has been designed, constructed and tested. High density plasma was successfully produced and diagnosed with Langmuir probe. The measured maximum plasma density in this work was $10^{11}cm^{-3}$ with 295 gauss of magnetic field and electron temperature was about 3.5eV. The uniformity of plasma densities in the radial direction was excellent with 160 gauss of magnetic field on the cross section which is 10cm apart from the edge of the exciting coil.

1. 서 론

Helicon wave는 강한 자기장이 걸려 있는 양호한 전도체(저온의 금속 또는 플라즈마)를 전파하는 저주파의 전자기파를 일컫는 것으로서 1961년 Bowers[1] 등이 solid state plasma내에서 관측 한 후 1962년에 Rose[2] 등, 1965년에 Lehane과 Thoneman[3]이 관측하였으며 Harding과 Thoneman[4]은 1965년에 기체 플라즈마 내에서도 helicon wave를 관측하였다. 이와 같은 관측과 함께 1962~1969년 사이에는 Woods[5-6], Klozenberg[7], Davies와 Christiansen[8] 등에 의하여 helicon wave에 관한 기초 이론이 집중적으로 연구되었다.

1970년 Boswell[9]이 helicon wave를 이용하여 plasma를 발생시키고 기존의 plasma 발생 장치에 비하여 고밀도 plasma를 얻는데 유용한 방법이라는 것이 알려진 이래 gas laser media, plasma lenses 및 plasma reactor for material processing 등에 이용하고자 하는 연구가 1980년대부터 활발히 진행되고 있다.

이들 연구는 주로 미국과 일본에서 활발히 진행되고 있는데 Boswell[10-14]등은 직경 10cm 튜브 에 7~10MHz, 1kw의 r.f.를 이용하여 $10^{13}cm^{-3}$ 밀도의 Ar 플라즈마를 발생시켰으며 7 MHz, 3.5kw 이면 기체레이저에 응용할 수 있는 $10^{14}cm^{-3}$의 밀도도 가능할 것으로 보고하였다. Perry와 Boswell[15]은 13.56 MHz, 1kw helicon wave로 SF_6 플라즈마를 발생시키고 Si와 SiO_2의 식각율에 관한 연구를 수행하였다. Helicon wave의 이와 같은 높은 이온화율은 collisoinal absorption으

로는 설명할 수 없으며 Landau damping에 의한 에너지 흡수로 설명될 수 있음을 Chen[16] 등은 보였다.

1993년 H. Kitagawa[17] 등은 NF_3 플라즈마에 의한 Si의 식각특성에 관한 보고를 하였으며 미국의 Plasma & Material Technologies, Inc.(P.M.T.)사는 최초의 상용 plasma wave reactor를 개발하였다.

국내에서는 1992년부터 서울대[18-19]에서 helicon wave에 관한 연구를 시작한 이래 한국과학기술원[20], 한국표준과학연구원[21] 등을 중심으로 기초적인 연구가 진행되고 있다.

Helicon wave에 의한 plasma 발생은 높은 에너지 흡수율 외에 분산식이 n/B=상수(n=플라즈마 밀도, B=정자장)가 되어 외부에서 인가한 자장에 의하여 쉽게 플라즈마 밀도가 제어 될 수 있으므로 식각율을 각종 요구에 맞춰 용이하게 제어 할수 있으며 diode형에 비하여 저압에서 작동되고, ECR에 비하여 저주파, 저자장에서 작동 되므로 장비 가격을 저렴하게 할 수 있으며 플라즈마 밀도가 10배 이상되는 장점을 가지고 있다.

고밀도, 고효율의 플라즈마 발생기술은 thermonuclear fusion 장치에 응용될 수 있을 뿐만 아니라 high processing rate, low pressure 식각 장치 및 다이아몬드 박막 합성 등의 신소재 개발 등에 널리 이용되고 있어 이 기술의 확보는 첨단 산업분야에 직접 응용 될 수 있어 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 helicon wave plasma source를 설계 제작하고 helicon wave plasma를 발생시켜 그 특성을 진단하였다.

제작된 장치에 의하여 발생된 Ar 플라즈마 밀도는 여기 코일로부터 거리 Z가 5cm이고 축상에서 295gauss의 자장일때 약 $10^{11}cm^{-3}$이었으며 전자온도는 약 3eV이었다.동경 방향에 대한 플라즈마 밀도는 B=160gauss, Z=10cm일때 직경 6cm 영역에서 균일하였으며 이때 밀도는 $7\times10^{9}cm^{-3}$이었다.

2. Helicon wave 플라즈마 발생의 이론적 배경

반경 a인 원통에 균일한 플라즈마가 있고 원통 방향(z축)으로 균일한 자기장이 걸려 있는 영역을 전파하는 전자파의 간단한 형태는 다음과 같은 식에 의하여 구해진다.

$$\nabla\times E=-\partial B/\partial t \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\nabla\times B=\mu_0 j \quad \cdots\cdots (2)$$

$$E=j\times B_0/en_0 \quad \cdots\cdots (3)$$

여기서 n_0 와 $B_0=B_0z$는 평형상태의 플라즈마 밀도와 자기장이며 B, E 및 j_z는 자기장, 전기장 및 전류의 섭동이다.

식(2)에서 변위 전류는 무시하였으며, 식(3)에서 플라즈마전류는 전자의 E×B guiding center drift에만 의존하며 $E_z=0$으로 가정한 것이다.

이와 같은 가정은

a) 전자의 cyclotron motion은 너무 빨라 전류에 기여할 수 없으며($\omega<<\omega_c$)

b) ion motion은 너무 느려서 역시 전류에 기여 할 수 없고($\omega<<\omega_c$=lower hybridfrequency)

c) dissipation effect를 무시 (플라즈마의 비저항=0)하였음을 의미하는 것이다.

Dissipation effect를 무시하면 j_z는 임의의 값을 가질 수 있고 j의 z축에 수직성분 $j_\perp$는

$$j_\perp=-en_0E\times B_0/B_0^2 \quad \cdots\cdots (4)$$

으로 주어진다.

섭동을 $\exp i(m\theta+k_zz-\omega t)$의 형태로 표현하면 식 (1)과 (3)에서

$$i\omega B=\nabla\times E=\nabla\times(j\times B_0)/en_0$$

$$=(ik_zB_0/en_0)j \quad \cdots\cdots (5)$$

이고, 식(2)를 대입하면

$$B=\left(\frac{\omega}{k_z}\,\frac{\mu_0en_0}{B_0}\right)^{-1}\nabla\times B \quad \cdots\cdots (6)$$

이다. k를 아래와 같이 정의하면

$$k \equiv \frac{\omega}{k_z}\frac{\mu_o e n_o}{B_o} = \frac{\omega}{k_z}\frac{\omega_p^2}{\omega_c c^2} \quad \cdots\cdots (7)$$

여기서 $\omega_c = eB_o/m$: 전자의 싸이클로트론 진동수

$\omega_p = (n_o e^2/\varepsilon_o m)^{1/2}$: 플라즈마 진동수

식(6)은

$$\nabla \times B = kB \quad \cdots\cdots (8)$$

식(8)의 양변에 $\nabla\times$을 하면

$$\nabla \times B + k^2 B = 0 \quad \cdots\cdots (9)$$

이고 (8)을 (2)에 대입하면

$$j = (k/\mu_o)B \quad \cdots\cdots (10)$$

이다.

식(9)를 원통 좌표계에서 표현하면 z성분은 Bessel 방정식이 되며 $r=0$에서 finite한 해는 $J_m(k_\perp r)$이 된다. 즉

$$B_z = C_3 J_m(k_\perp r) \quad \cdots\cdots (11)$$

여기서 $k_\perp = \overline{k^2} - k_z^2$으로서 transverse wavenumber이다.

식 (11)을 이용하여 r, θ성분을 구하면

$$B_r = C_1 J_{m-1} + C_2 J_{m+1} \quad \cdots\cdots (12)$$

$$B_\theta = i(C_1 J_{m-1} - C_2 J_{m+1}) \quad \cdots\cdots (13)$$

이 되고, 여기서

$$C_1 = (k+k_z)A,\ C_2 = (k-k_z)A,\ C_3 = -2ik_z A$$

이다.

식(11), (12), (13)을 식(1)에 대입하여 전기장을 구하면

$$E_r = (\omega/k_z)B_\theta = i(\omega/k_z)(C_1 J_{m-1} - C_2 J_{m+1}) \quad \cdots\cdots (14)$$

$$E_\theta = -(\omega/k_z)B_r = -(\omega/k_z)(C_1 J_{m-1} - C_2 J_{m+1}) \quad \cdots (15)$$

$$E_z = 0 \quad \cdots\cdots (16)$$

이다.

반경이 a인 부도체 원통이면 경계조건 $r=a$에서 $j_r=0$를 만족시키기 위하여 식 (10)에서 $B_r=0$가 되어야 한다. 만약 도체이면 경계조건은 $E_\theta=0$이고 이는 식(15)에서 $B_r=0$가 되므로 경계에서 $B_r=0$가 되는 것은 원통이 도체이던 부도체이던 관계없이 성립된다.

따라서 식(12)를 바꾸면 경계조건 $B_r=0$는 $mkJ_m(k_\perp a) + kaJ_m'(k_\perp a) = 0$ ····· (17)

가 된다.

식 (17)로 부터 분산관계식 $\omega=\omega(k)$를 구할 수 있다.

즉 m=0 mode이면 식(17)은 $J_1(k_\perp a)=0$이고 이의 해는 $k_\perp a = Z_m = 3.83$이 된다. 원통이 길고 가늘면 $k_z a \ll 1$이 되어 $k \approx k_\perp$, $ka \approx k_\perp a = Z_m = 3.83$이므로 식(7)에서

$$\frac{B_o}{n_o} = \frac{\mu_o e}{k}\frac{\omega}{K_z} = \frac{\mu_o e a}{Z_n}\frac{\omega}{K_z} \quad \cdots\cdots (18)$$

이고 $m \geq 1$인 경우는

$$\frac{B_o}{n_o} = \left(\frac{\omega}{K_z} + \frac{\omega a}{m Z_m^2}\right)\frac{\mu_o e a}{Z_n} \quad \cdots\cdots (19)$$

가 된다. 여기서 m=1이면 $Z_m=3.83$이다.

식(19)에서 두번째 항은 $k_z/k_\perp \ll 1$ order이므로 무시하면 (실험에서 원통의 반경 3cm, λ=1m이면 $k_z/k_\perp \approx 0.05$ 정도임) 식(18)과 (19)에서 m=0,1 mode helicon wave의 위상속도 ω/k_z는 B_o/n_o에 비례한다. 따라서 r.f.의 ω와 exciting coil의 길이를 결정하면

$$B_o/n_o = \text{상수} \quad \cdots\cdots (20)$$

가 되어 플라즈마 밀도를 B_o, a, ω와 λ로서 결정할 수 있다.

3. Helicon wave plasma source장치 제작 및 플라즈마 특성

3. 1 장치의 개요

전체 장치는 고주파원, 여기 코일, 평행 자장인가 코일, 방전함, 임피던스 결합 소자 및 진공장치로 구성되어 있으며 이의 개략도를 그림 1에 보였고 각 부품별 설계 고려 사항은 아래와 같다.

3. 1. 1 고주파원

고주파원은 최대출력 15Kw인 일본 도우로사 제품의 100KHz/4MHz 겸용의 고주파 발진기에서 4MHz를 사용하였다. 이 장치는 3상 220V의 입력을 thyristor 제어 방식으로 조절, 정류하여 양극 동조 발진회로를 써서 발진하는 양식이다.

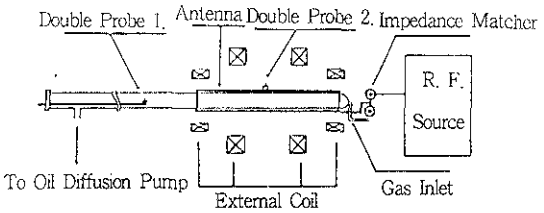

Fig. 1. Schematic diagram of whole apparatus.

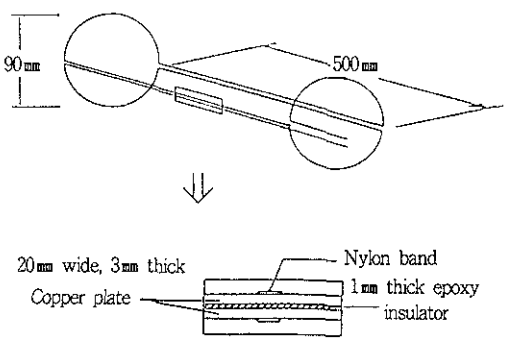

Fig. 2. Schematic drawing of Nagoay Type-III antenna.

3. 1. 2 여기 코일

여기 코일은 방전함 내에 r.f.power를 전달하여 플라즈마를 발생시키는 장치로서 본연구에서는 *Nagoya Type-III*형으로 선택하였다. 그림 2와 같은 여기 코일은 직경 90㎜인 반원 4개와 이 반원을 연결해 주는 직선부분으로 구성되어, 직선부분으로 둘러싸인 여기 코일의 중앙에서 축방향과 수직인 섭동자장이 형성 되도록 하였다. 4개의 반원과 직선부분은 모두 두께 3.1㎜, 넓이 20㎟로 된 구리판을 사용하였으며 각 부분은 은용접으로 연결하였다. 여기 코일 직선부분의 위쪽과 아래쪽은 두께 2㎜의 에폭시판으로 절연시켰으며 구리판의 모서리 부분에서 절연파괴를 막기 위하여 열수축 튜브로 판을 감싼 다음 넓이 10㎜의 홈을 파서 공냉으로 여기 코일에 생기는 열을 제거할 수 있도록 하였다.

R.f.전원과 연결되는 부분은 층과 층을 테프론판으로 절연시켰으며 여기 코일의 링 안쪽에 나일론 튜브를 끼워 넣어서 파이렉스 튜브와 여기 코일이 직접 접촉하는 것을 방지하였다.

여기 코일의 직선부분의 길이는 Landau damping이 효과적으로 일어날 수 있는 조건 $\omega/k_z \approx v_{th}$ 이 만족되도록 다음과 같이 50㎝로 하였다.

즉

$$\omega/k_z = v_{th} = (2eE_f/m)^{1/2} = 5.93\times 105\sqrt{E_f}\ ms^{-1}$$

여기서 E_f는 eV 단위로 된 전자의 에너지이다.

Ar인 경우 ionization cross-section이 최대가 되는 전자에너지는 약 50eV 이므로 이 값을 사용하면[16, 22]

$$\frac{\omega}{k_Z} = f\lambda = 4.19\times 10^6 m/s$$

가 된다. 따라서 4MHz이면 $\lambda \approx 1m$가 되고 직선부분의 길이 $L=\frac{\lambda}{2}=50cm$가 된다.

3. 1. 3 평행 자장 인가 코일

방전함 내에 균일한 자장을 축방향으로 인가하기 위하여 설계 제작한 평행 자장 인가 코일은 주코일과 보조코일로 구성되었다. 주코일은 7㎜×7㎜ 단면에 직경 3.5㎜의 구멍이 뚫려있는 구리관을 중심 반경 20㎝로 76회 권선한 코일 뭉치 두개를 중심거리 20㎝ 떨어지도록 그림 3과 같이 배치하였으며 자장의 균일성을 증대시키기 위하여 주코일에 사용한 것과 같은 구리관을 중심 반경 12㎝로 38회 권선한 코일 뭉치 두개로 구성된 보조 코일을 설치하였다. 보조 코일의 위치와 재원은 POISSON Code를 수행하여 결정 하였으며 그 위치는 그림 3에 보였다. 이와같이 제작된 평행 자장 인가 코일의 자장 분포를 알아보기 위하여 비오-사바르 법칙으로 계산한 자력선 분포를 그림 3에 보였다. 그림 3에서 중앙선은 코일의 축이며 정사각형은 주코일, 직사각형은 보조 코일의 위치를 표시한 것이다. 이 계산 결과는 방전함이 위치할 영역에서 자기장이 균일함을 보여 주고 있다. 본 실험에서는 코일에 최대 120 A를 흘릴 수 있었으며 그 때 자기장의 세기는 420 Gauss이었다.

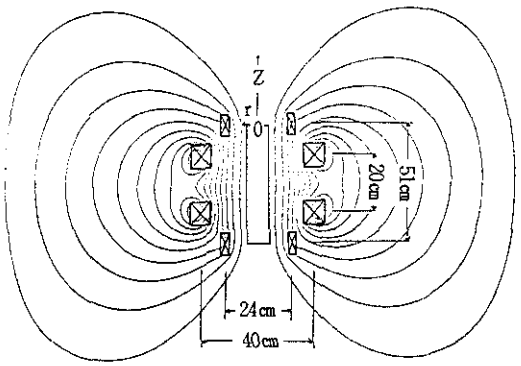

Fig. 3. Magnetic field lines in plasma chamber and coordinate system used in the experiments. Crossed squares and rectangles are magnetic coils and long rectangle is antenna. The origion of the coordinate system is located at the end of the antenna.

3. 1. 4 방전함

방전함은 절연체이면서 동시에 고온과 온도차이에 대한 강도가 비교적 좋은 파이렉스 튜브를 사용하였다. 관의 내경은 분산식에서 볼 수 있는 바와 같이 플라즈마 밀도에 반비례하고 있으므로 고밀도의 플라즈마를 얻기 위해서는 내경이 작을수록 좋다. 본 연구에서 사용한 관의 내경은 7cm, 길이는 150cm이었다.관의 길이를 여기코일의 길이 50cm보다 길게 선정한 것은 진공계의 교란이 플라즈마 밀도에 영향을 주는 것을 극소화 하기 위해서이다. 이와같은 파이렉스 튜브의 한쪽 끝에 Ar 개스 주입구를 제작하고 관의 반대편 끝은 진공계에 연결하였다.(그림1)

3. 1. 5 임피던스 결합 소자

r.f.전원 내부 임피던스와 여기 코일의 임피던스, 회로 상의 임피던스의 결합을 위하여 최고용량이 1000pF인 Zenning사의 Vacuum Variable Capacitor(V.V.C) 두개를 사용하였다. 결합은 r.f.출력을 여기 코일과 결합부분에 입력시켜 놓고 V.V.C의 용량을 변화 시킴과 동시에 전압과 Rogowski Coil을 이용해서 측정한 전류의 위상차를 관찰하여 위상차가 가장 작을 때를 택하는 방법으로 이루어졌다. 방전이 일어나면 플라즈마가 유한한 인덕턴스를 가지게 되고 여기 코일과 플라즈마 사이의 permitivity가 방전 前과는 다르게 변하므로 방전시의 임피던스 변화를 맞추기 위해 미세 조정을 하였다.

3. 1. 6 진공계

진공계는 Mechanical Pump와 120 ℓ/min 용량의 유확산펌프 및 기저압력 측정용으로 UNITEC사의 이온게이지, 동작시 압력 측정을 위한 Balzers의 pirani gauge로 구성하였다.

3. 2 플라즈마 진단

제작된 장치의 중요 부분은 그림 4에 보였다.

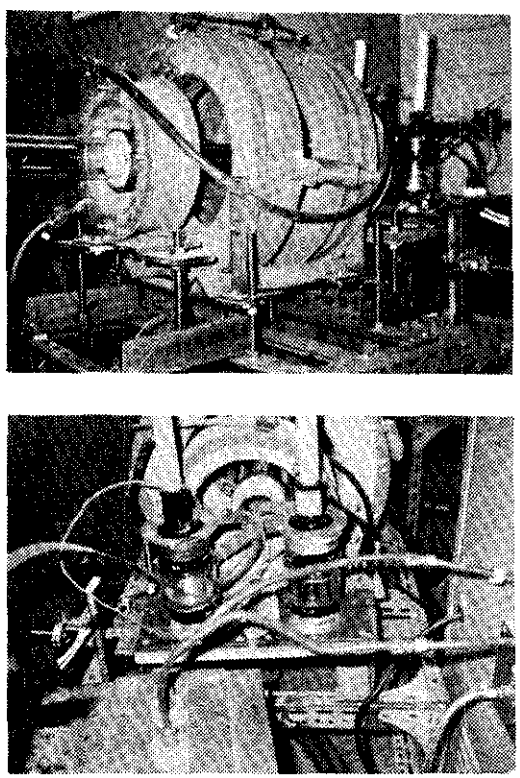

Fig. 4. Photographs of the apparaturs (a) external magnetic coils, (b) impedance matchining devices.

식각장비에 응용 가능성을 타진하고 차후 개선점을 파악하기 위하여 이중탐침에 의한 예비진단을 하였다. 측정 위치는 원점을 여기 코일의 좌측 끝에(개스 주입구 반대편) 잡고 축방향을 Z축으로 하였고 동경 방향을 r축으로 택하였다.

측정시 Ar 기체 압력은 1mTorr를 유지하였고 측정은 r=0, 1, 2, 3cm, Z=5, 10, 20, 30cm, B=90, 160, 225, 295gauss에서 행하였다. 측정된 데이터를 정리하여 B=90, 160, 225, 295gauss일때 r과 Z의 함수로 플라즈마 밀도와 전자온도를 구하였으며(그림5) r=0, 1, 2cm일때 플라즈마 밀도와 B의 관계를 그림 6에 보였다.

측정된 플라즈마 밀도 중 최대값은 B=295 gauss r=2, Z=5cm일때 $2\times10^{11}cm^{-3}$이었으나 여

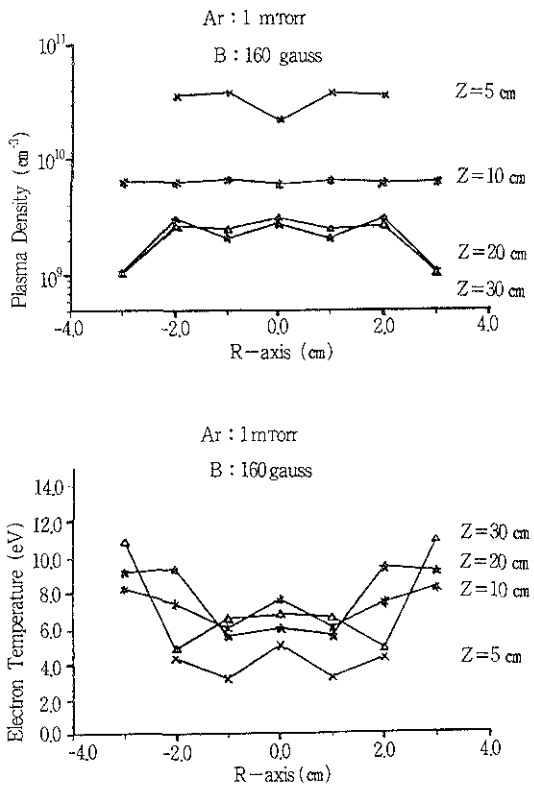

Fig. 5. Radial distance vs plasma density (a) and electron temperature (b) for 160 gauss magnetic field and 1mtorr Ar pressure.

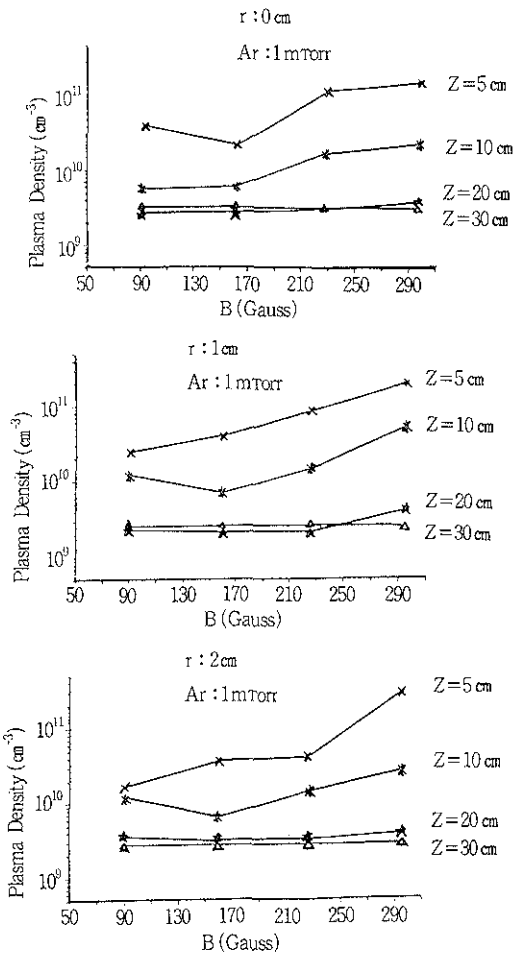

Fig. 6. Plasma density v.s. magnetic field. at r=0(a), r=1cm(b), r=2cm(c).

기 코일 내의 플라즈마 밀도는 보다 클 것으로 예상된다. 반면 전자온도의 최대값은 자기장에 관계없이 r=3, Z=30cm에서 11eV이었다. Z=5cm에서 r축에 대한 플라즈마 밀도 분포는 B=90과 225gauss일때 r=0에서 최대값을 가졌으나 B=160과 296gauss에서 최대값을 나타냈다.

일반적으로 측정이 수행된 영역에서 플라즈마 밀도는 균일하지 않았다. 이는 Z값을 고정시키고 동경방향에 대한 균일성도 같은 결과이다. 식각장비로 응용코저 한다면 Z축에 대한 균일성은 문제가 되지 않지만 동경방향에 대한 균일성은 확보되

어야 할 중요한 요건이다. 본 연구에서는 B=160gauss이고 Z=10cm일때 동경방향에 대한 균일성이 10% 이내로 유지됨을 확인하였다.(그림 5(a)) 이때 플라즈마 밀도는 $5\times10^{9}cm^{-3}$이었다.

그러나 이때 전자온도는 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 균일하지 않았다.

식(20)에 의하면 helicon wave에 의하여 여기된 플라즈마 밀도는 평행자장에 비례한다. 본 연구에서는 r.f.가 4MHz, 여기 코일의 길이, 튜브의 반경 a=3.5cm를 사용 하였으므로

$$\frac{B_o}{n_o}=2.1\times10^{-11}a\ cm=7.35\times10^{-11}$$

이 된다. 여기서 B_o는 gauss, n_o는 cm^{-3}이다.

r=0에서 n/B를 그림 7에 보였다. 이 그림에 의하면 측정된 n/B값은 식(20)에 의한 결과와 2~3개의 order의 차이를 보이고 있다.

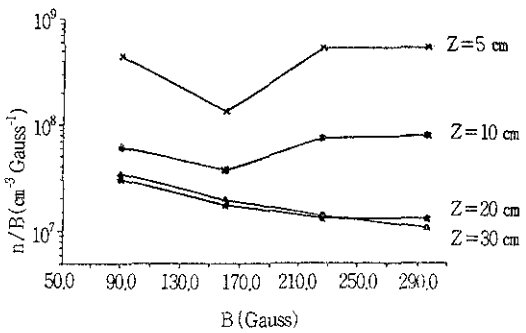

Fig. 7. n/B v.s. magnetic field at r=0.

4. 결 론

Helicon wave plasma source를 설계 제작하고 Ar 플라즈마를 발생시켜 그 특성을 진단하였다.

플라즈마 source 제작에 사용된 주요 부품 및 설계 제원은 표 1에 보였다.

플라즈마 밀도는 여기 코일로부터 거리 Z가 5 cm이고 방전함의 축상에서 최대치 $10^{11}cm^{-3}$로 측정 되었으며 이때 인가한 자기장은 295gauss이었다. 그러나 이 지점은 여기 코일 밖이었으며 여기 코일 안쪽에서는 이보다 높은 플라즈마 밀도를 보일 것으로 판단된다.

측정된 플라즈마 밀도의 균일성은 대부분의 영역에서 매우 좋지 않았으나 B=160gauss, Z=10 cm일때 동경방향에서 10% 내의 균일성을 보였다.

식각장비로 응용하기 위해서는 보다 정밀한 플라즈마 진단 기술의 확보와 균일성 및 플라즈마 밀도를 증가시키는 설계 기술의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1993년도 학술진흥재단 서울대학교 반도체 공동 연구사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드리는 바이다.

Table 1. Some important design parameters

장치		형태 및 재질	제원
구주파원		3극 진공관 Oscilator	최대출력 : 15Kw, 주파수 : 4 MHz
여기코일		Nagoya Type-III Antenna	길 이 : 50cm
평행자장 인가코일	주코일	Cylindrical	직경 : 40cm, 중심거리 : 19.5cm, Ampere Turns : 7,500
	보조코일	〃	직경 : 24cm, 주코일과의 거리 : 15.75cm, Ampere Turn : 3,800
방전함		Pyrex Tube	내경 : 70mm, 외경 : 76mm, 길이 : 149cm
임피던스 결합	소자	Vacuum Variable capacitor	최고용량 : 1,000pf
	network	π	

참고문헌

1. R. Bowers, C. Legendy, and F. E. Rose : Phys. Rev. Lett. 7 (1961) 339
2. F. E. Rose, M. T. Taylor, and R. Boswell : Phys. Rev. 127 (1962) 1122
3. J. A. Lehane and P. C. Thonemann : Proc. Phys. Soc. 85 (1965) 301
4. G. N. Harding and P. C. Thonemann : Proc. Phys. Soc. 85 (1965) 317
5. L. C. Woods : J. Fluid Mech. 13 (1962) 570
6. L. C. Woods : J. Fluid Mech. 18 (1964) 401
7. J. P. Klozenberg, B. McNamara, and P. C. Thonemann : J. Fluid Mech. 21 (1965) 545
8. B. J. Davies and P. J. Christiansen : Plasma Phys. 11 (1969) 987
9. R. W. Boswell : Phys. Lett. 33A (1970) 457
10. R. W. Boswell, R. K. Portenus : Prytz A., Bouchoule A. and Ranson P., Phys. Lett. 91A (1982) 163
11. R. W. Boswell : Plasma Phys. and Controlled Fusion 26 (1984) 1147
12. R. W. Boswell and D. Henry : Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 1095
13. R. W. Boswell and R. K. Porteus : Appl. Phys. Lett. 50 (1987) 1130
14. R. W. Boswell and R. K. Porteus : J. Appl. Phys. 62 (1987) 3123
15. A. J. Perry and R. W. Boswell : Appl. Phys. Lett. 55 (1989) 148
16. F. Chen Francis : Plasma Phys. Contr. Fusion 33 (1991) 339 and references therein
17. H. Kitagawa, A. Tsunoda, H. Shindo, and Y. Horiike : Plasma Sources Sci. Technol. 2 (1993) 11
18. 정기형, 양형렬 : 석사학위논문 (서울대학교 대학원) (1993)
19. 황기웅, 이병일 : 석사학위논문 (서울대학교 대학원) (1994)
20. 김정형, 송선규, 장홍영 : 응용물리 7 (1994) 59
21. 김성규, 박철웅, 유용심, 이홍순, 최운상, 박준교, 곽종구 : 과학기술처 연구 보고서 (KRISS-93-121-IR) (1993)
22. J. A. Sanchez, J. A. Aguilera, B. Martinez, and J. Campos : Phys. Rev. A 41 (1962) 1392