한국표면공학회지
Journal of the Korean Institute of Surface Engineering
Vol. 32, No. 6, Dec. 1999
<연구논문>

헬리콘 플라즈마원의 특성

현준원, 노승정, 김경례, 김창연, 김현후 *

단국대학교 응용물리학과, * 두원공과대학 전자공학과

Characterization of a Helicon Plasma Source

J. W. Hyun, S. J. Noh, K. R. Kim, C. Y. Kim, H. H. Kim *

Department of Applied Physics, Dankook University
* Department of Electronic Engineering, Doowon Institute of Technology

Abstract

Helicon sources are attractive for plasma processing because they provide high plasma density in low magnetic fields. Helicon waves were excited by a Nagoya type III antenna in a magnetized plasma column. Plasma parameters were measured with a double probe, and the structure and adsorption of the helicon wave fields were determined with the probes. Argon is fed through a MFC (mass flow controller) for operation pressure of 10~110 mtorr. A 13.56 MHz r.f. power of 50~450 W is induced through the antenna. The plasma density and electron temperature are measured as functions of external magnetic field, r.f. power and pressure. The plasma density as functions of r.f. power and magnetic field at a constant pressure increased linearly, and the electron temperature did not change largely with various operation parameters and the value was around 5~7 eV.

1. 서 론

최근 다양한 형태의 저압, 고밀도 플라즈마가 고효율원으로 개발되고 있다. 낮은 진동수의 휘슬러파(Whistler wave)가 원통 안에 구속되면 전자기적 성질을 잃고 부분적으로 정전기적 성질로 변하며, 그들의 전파 및 편광 특성도 변하게 되는데 이렇게 구속되어진 휘슬러파를 헬리콘이라 하고 고체상태 플라즈마에서 처음 발견되었다. 1985년 Chen은 헬리콘의 에너지가 전자로 확산되는 Landau damping을 제안했고, 그후 많은 논문들이 Landau damping과 헬리콘 source의 응용가능성에 대해 발표되었다[1-4]. 고체상태 플라즈마 연구로부터 관찰된 헬리콘파는 r.f. 구동안테나에 의해 여기되며, 교차모드(mode)는 원통을 따라 전파되고, 모드에너지는 충돌 또는 비충돌감쇠에 의한 플라즈마 전자들에 의해 흡수되는데 지금까지 알려진 헬리콘 플라즈마 장점으로 첫째, 자장의 변화에 따라 플라즈마 밀도 및 이온의 에너지를 조절할 수 있으며 둘째, 안테나의 위치가 진공챔버

외부에 위치하므로 내부오염을 최소화할 수 있고 셋째, r.f. 안테나의 길이와 진동수에 의해 전자의 에너지를 조절할 수 있다는 점을 꼽을 수 있다[5,6].

많은 헬리콘 모드(helicon mode)들이 안테나 경계에서 여기되며, 안테나의 종류가 모드를 결정한다. 일반적으로 풀-턴 루프 안테나(full-turn loop antenna)의 모드는 m=0, 보스웰 및 나고야 타입Ⅲ 안테나 모드는 m=+1이다. m=+1 모드는 다른 모드들과 비교할 때 파장이 가장 짧다[7]. 이러한 모드를 구별하는데 이용되는 다음의 헬리콘파 분산식으로부터 플라즈마 밀도는 자기장과 r.f. power에 비례하고 반응관의 원통반경에 반비례함을 알 수 있다[8].

$$\frac{w}{k} = \frac{3.83B_0}{e\mu_0 an} \quad (1)$$

a : 균일하게 자화된 플라즈마 반경
n : 플라즈마 밀도
B_0 : 자기장
k : 파 벡터(wave number)
ω : 주파수

헬리콘 파를 이용한 플라즈마원의 특성진단은 대개의 시스템에서 보편적으로 사용되는 단일탐침 진단과는 달리 r.f의 노이즈(noise)를 최소화하기 위해 이중탐침 진단이 필요하다. 헬리콘파의 전파특성은 r.f. power, 자장의 크기 및 안테나 디자인에 매우 큰 영향을 받게 되는데, 다시말해 r.f. power와 자장의 크기는 플라즈마 밀도 변화와 헬리콘 파의 전파모양에 큰 영향을 미치게 된다[9].

본 연구에서는 13.56 MHz 고주파 장치를 구성하고, 이중탐침을 제작하여 플라즈마에 삽입하였을 때 전류와 전압의 관계, 즉 탐침의 특성으로부터 자장과 플라즈마 밀도의 1차종속성을 관찰하고, 압력과 탐침의 위치에 대한 플라즈마 밀도와 전자온도를 측정하였다.

2. 실험방법

그림 1은 헬리콘파를 이용하여 플라즈마원의 특

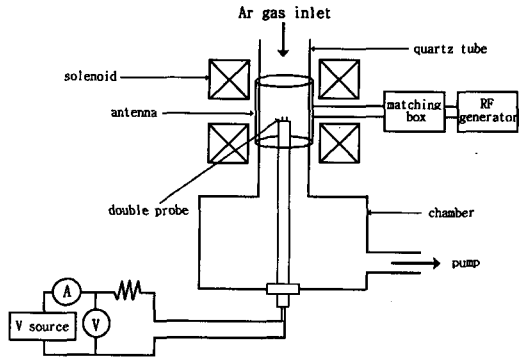


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus.

성을 진단하기 위한 장치의 개략도이다. 플라즈마 발생관의 직경과 길이는 각각 74 ㎜와 760 ㎜이며, 헬리콘파를 여기시키는 r.f 안테나가 플라즈마 발생관 외부에 위치해 있다. 안테나를 감싸고 있는 두 개의 원통형 코일은 동축상으로 놓여져 균일한 자장을 최대 1000 gauss까지 얻을 수 있다. 그림 2는 헬리콘 플라즈마의 특성을 진단하기 위해 제작된 이중탐침의 개략도이다. 탐침의 팁(tip)은 플라즈마내 온도를 충분히 견딜 수 있도록 tantalum (Ta)으로 제작되었으며, 플라즈마에 노출된 팁의 직경과 길이는 각각 0.55 ㎜와 6.3 ㎜로 팁사이의 거리는 두 팁의 sheath가 겹치지 않을 정도로 최대한 가깝게 설치하였고, 팁의 한쪽 끝은 세라믹으로 연결하였다. 팁을 탐침도선과 연결하기 위해 구리봉으로 중간연결을 하였으며, 탐침 하단은 에폭시를 사용하여 진공의 누설을 방지하였다. 상세한 실험조건을 표 1에 나타내었다. 탐침에 전압이 인가

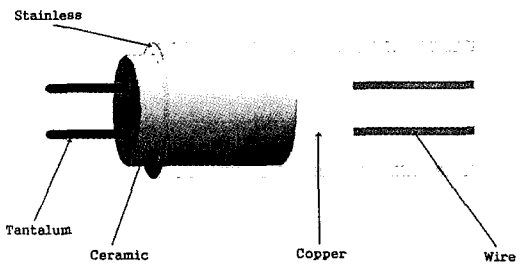


Fig. 2. Schematic diagram of double probe.

Table 1. Working conditions of helicon plasma.

r.f power	50~450W (13.56 MHz)
Pressure	10~110mtorr
Magnetic field	100~700gauss
Reaction gas	Ar

될때 하전입자들로부터 생성된 전류를 그린 I-V 특성곡선을 구하기 위해 탐침 양단에 -200~200V의 sweep 전압을 가하여 1V마다 전류값을 측정하도록 하였다. sweep 전압과 전류 측정은 source-meter (Keithley 2410)를 사용하였다. I-V 특성곡선의 이온포화 영역으로부터 여러 동작변수들의 상관관계를 조사하였다. 플라즈마 밀도에 대한 압력효과, r.f. power와 자장의 함수로써 플라즈마 밀도 등을 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

헬리콘 플라즈마의 전기적 특성을 관찰하기 위해 제작된 이중탐침을 가지고 r.f. power, 외부자장 및 압력 등으로부터 플라즈마 밀도와 전자온도를 조사하였다. 다음의 식들을 이용하여 이중탐침법에 의해 얻어진 I-V 특성곡선으로부터 이온 포화전류와 전자온도가 결정되었다. 먼저 두 탐침의 팁 면적이 같다고 가정하면 I-V 특성곡선으로부터 전자밀도를 구하기 위해 전자온도 T_e는

$$T_e = \frac{e}{k}\left(\frac{I_a I_b}{I_a + I_b}\frac{dV}{dI}\Big|_{I=0}\right) \quad (2)$$

여기서 k는 볼쯔만 상수(Boltzmann constant), I_a와 I_b는 두 탐침의 이온 포화전류이다. 전자밀도(n)는 전자온도와 측정된 이온 포화전류값으로부터 $I_a = I_b = I$이면

$$n = \frac{I}{0.91 A_e}\sqrt{\frac{m_i}{kT_e}} \quad (3)$$

여기에서 A_e는 탐침팁의 면적, m_i는 이온질량이다[10,11]. 그림 3은 헬리콘 플라즈마에 대한 이중탐침 측정결과로 50 W의 r.f. power에서 측정된 전형적인 I-V 특성곡선을 보여준다. 그림 4는 여러 전류값에 대한 축상의 자장분포를 가우스미터(Gaussmeter)로 측정한 결과를 나타낸다. 전류가 상승함에 따라 자장값이 선형적으로 증가하지만 플라즈마 발생관과 안테나를 둘러싸고 있는 두 개의 헬름홀쯔 코일(Helmholtz coil)이 위치한 부분에서는 균일한 자장이 분포되어 있으나 안테나 단자를 빼내기 위한 두 코일뭉치 사이의 빈 공간간격 사이에서는 자장의 세기가 코일이 위치한 부분에 비해 약 10%정도 감소하였다.

그림 5는 축상의 자장을 300 gauss로 고정시켰을 때 r.f power 함수로서 플라즈마 밀도와 전자온도를 도시한 그림이다. 일반적으로 r.f power와

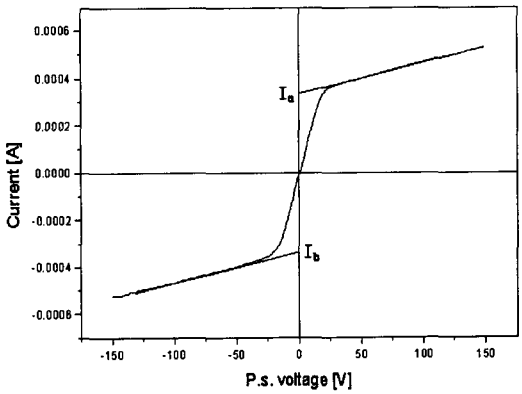


Fig. 3. Measured typical I-V characteristic curve of double probe at 50 W.

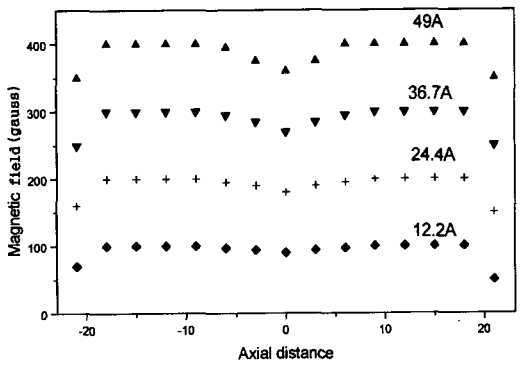
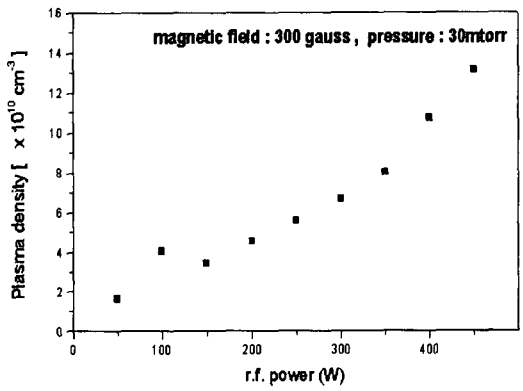
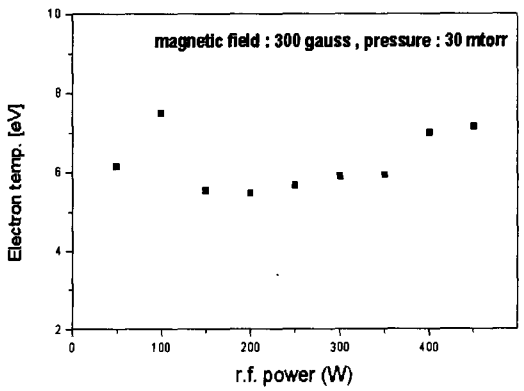


Fig. 4. Magnetic field at various axial distances.

축상의 자장 증가는 플라즈마의 밀도를 증가시키는 변수로써 보고되어 왔다[12]. r.f power 증가는 공명현상으로 인해 전자에너지를 증가시키며 중성 입자들을 충분히 여기함으로써 플라즈마 밀도를 증가시킨다. 압력은 30 mtorr로 고정하였는데, 만일 반응압력이 높으면 공명이 일어나기 전에 전자가 다른 입자들과 충돌하여 에너지 손실을 야기하기 때문에 공명현상이 일어나지 않게 된다. 그림 5(a)의 경우 300 W 이하의 낮은 r.f power에서는 플라즈마 밀도가 완만하게 증가하는 경향을 보이지만 350 W를 문턱값으로 플라즈마 밀도가 크게 증가하였는데, 이는 헬리콘 안테나의 변동자기장이 플라즈마 반응과 내부에 큰 전기장을 인가하게 되어 플라즈마 밀도를 높이게 된다. 그림 5(b)는 r.f power 함수로서 전자온도의 변화를 보여준다. 전자온도는 그림 3의 기울기에서 탐침전압과 이온전류의 관계로부터 구할 수 있는데, r.f power가 증가함에 따라 전자온도는 5~7 eV의 값을 나타내었다. 그림 6은 r.f power를 300 W로 고정시켰을 때 자장의 함수로써 플라즈마 밀도와 전자온도를 보여준다. 분산식 (1)로부터 위상속도 $\frac{w}{k}$가 고정되어 있을 때 플라즈마 밀도는 자장에 따라 증가하게 된다. I-V 특성곡선으로부터 결정된 플라

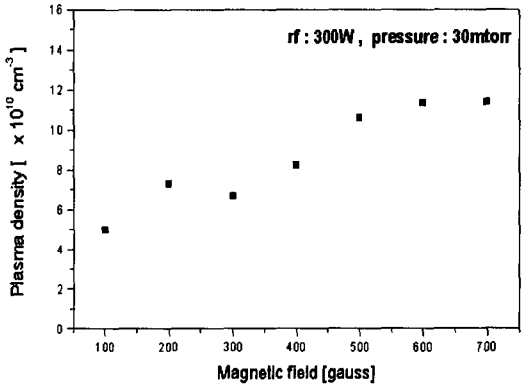


(a)

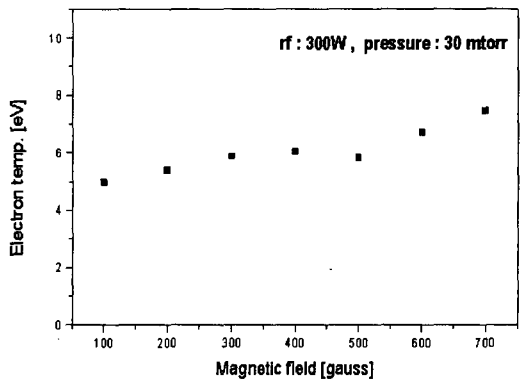


(b)

Fig. 5. (a) Plasma density and (b) electron temperature vs. r.f. power.



(a)

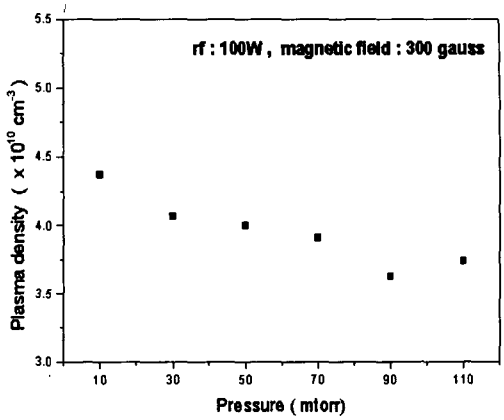


(b)

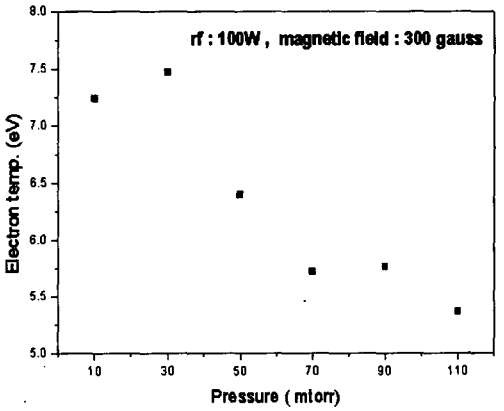
Fig. 6. Magnetic field dependence on (a) plasma density and (b) electron temperature.

즈마 밀도와 자장의 선형적 관계가 문턱자장값 이상에서 분산식과 잘 일치하고 있다. 300 gauss를 문턱값으로 그 이하의 낮은 자장 범위에서는 여기된 헬리콘파 대신에 약하게 이온화된 플라즈마로 존재하므로 플라즈마 밀도가 불안정하게 되어 분산식을 만족하지 못하나 문턱값을 넘어서 분산식이 만족하면 헬리콘파가 크게 향상되고, 플라즈마 밀도가 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 증가하는 자장에 따라 입자의 궤도는 helica motion을 하게 되므로, 전자는 자장에 의해 가속될 뿐만 아니라, 중성기체와 충돌할 확률이 더 크게 되므로 플라즈마 밀도는 증가하나 전자온도의 경우 이 두가지 이유로 부분적으로 증가-감소하는 형태를 보인다. 따라서 r.f power와 자장값이 상승함에 따라 플라즈마 밀도는 선형적으로 증가하는 경향을 보였으나, 전자온도의 경우 여러 동작변수에 대해 그 변화폭이 완만하였다. 그림 7은 플라즈마 밀도에 대한 압력효과를 나타낸다. 플라즈마 밀도는 압력이 증가함에 따라 감소하게 되는데, 고진공영역에서는 전자가 충분히 가속되는 반면 충돌할 중성기체수가 적기 때문에 플라즈마 밀도가 높지만 낮은 압력의 경우 충돌할 입자수의 증가로 인해 전자가 충분히 가속되기도 전에 다른 입자와 충돌하여 에너지를 잃고 산란됨으로써 플라즈마를 생성하지 못하므로 플라즈마 밀도가 감소하게 된다. 압력이 증가함에 따라 전자온도는 이러한 전자들의 잦은 충돌로 인해 7 eV에서 5.5 eV로 감소한다.

그림 8은 축 방향으로의 탐침위치 변화에 따른 플라즈마 밀도와 전자온도의 변화를 나타낸다. 플라즈마 밀도는 안테나의 중심보다 하부코일의 중심에서 더 높게 관찰되는데, 이는 자장의 분포가 하부 코일의 중심에서 가장 높을 뿐만아니라 가스 주입라인과 안테나 사이의 거리가 짧아 안테나의 상단부분에서 중성기체를 여기시키기도 전에 압력차로 인해 챔버방향으로 확산하기 때문인 것으로 생각된다. 열전도에 의해 하부코일 중심부에서 멀어질수록 전자에너지가 아래쪽으로 이동하게 되어 비탄성 충돌에 의해 이 에너지가 손실되면서 전자온도가 감소하게 된다. 플라즈마 밀도 역시 중심 코일로부터 멀리 떨어질수록 감소하게 되는데, 이는 확산하는 전자들의 수가 증가함에도 불구하고 반응관 아래 챔버로 전자의 축상 손실효과로 보여진다.



(a)

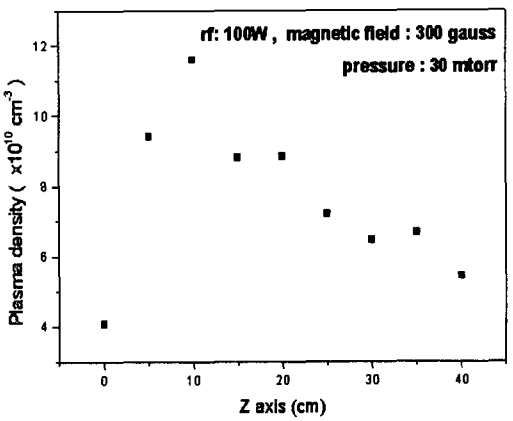


(b)

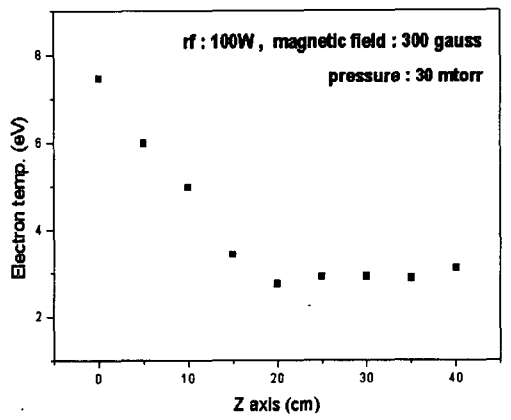
Fig. 7. (a) plasma density and (b) electron temperature as a function of pressure.

4. 결 론

헬리콘 플라즈마원이 나고야 타입III 안테나에 의해 여기되었다. 플라즈마원의 특성진단을 위해



(a)



(b)

Fig. 8. (a) plasma density and (b) electron temperature at various z axis distances.

13.56 MHz 고주파 장치를 구성하고, Langmuir 탐침을 제작하여 플라즈마에 삽입하였을 때 I-V 특성곡선으로부터 r.f power와 자장에 따른 플라즈마 밀도와 전자온도를 결정하고, 압력과 탐침의 위치에 대한 플라즈마 밀도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. r.f power가 증가함에 따라 공명현상에 의해 전자에너지를 증가시키게 되며, 헬리콘 안테나의 변동자기장이 플라즈마 반응관 내부에 큰 전기장을 인가함으로써 플라즈마 밀도가 증가하였다. 분산식으로부터 위상속도가 고정되어 있을 때 자장의 함수로써 플라즈마 밀도는 선형적으로 증가하였다. r.f power와 자장의 함수로써 전자온도는 5~7 eV에서 그 변화폭이 완만하였다. 플라즈마 밀도에 대한 압력효과의 경우 빈번한 전자충돌로 인해 전자에너지를 상실하게 되어 압력이 증가할수록 플라즈마 밀도는 감소하였고, 전자온도 역시 7 ev에서 5.5 eV로 하락하였다. 축상 위치의 증가, 다시말해 중심 코일에서 거리가 멀어질수록 전자의 축상 손실로 인해 플라즈마 밀도와 전자온도가 감소하는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비 BSRI(물리학)-97-2452에 의해 연구되었슴.

참고문헌

1. F.F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion (2nd ed., Plenum Press 1984).
2. R.W. Boswell, Phys. Lett., 33A, 457 (1970).
3. R.W. Boswell and R.K. Porteous, Appl. Phys. Lett., 50, 1130 (1987).
4. P. Zhu and R.W. Boswell, Phys. Rev. Lett., 63, 2805 (1989).
5. M.H. Francombe, Physics of Thin Film (Academic Press, San Diego, 1994).
6. F.F. Chen, In High Density Plasma Sources (Noyes Pub, 1996).
7. R.T.S. Chen, R.A. Breun, S. Gross, N. Hershkowitz, M-K.J. Hsieh and J. Jacobs, Plasma Source Sci. Technol., 4, 337-334 (1995).
8. F.F. Chen and J. Chevalier, J. Vac. Sci. Tech., A10, 1389 (1992).
9. A.W. Molvik, A.R. Ellingboe and T.D. Rognlien, Phys. Rev. lett., 79, 223 (1997).
10. O. Auciello and D.L. Flamm, Plasma Diagnos-

tics (Academic Press, N.Y. 1989).

11. L.H Hufehimson, Principles of Plasma Dignostics (Cambridge Univ. N.Y, 1987).

12. F.F. Chen and R.W. Boswell, IEEE Transactions on Plasma Science, 25, 6, 1245-1253 (1997).