

축 방향 자장이 인가된 용량 결합형 라디오 주파수 플라즈마의 특성 연구

이호준, 이동영*, 태흥식**, 황기웅***

위덕대학교 전기공학과, **경북대학교 전자전기공학부, ***서울대학교 전기공학부

A study on the characteristics of axially magnetized capacitively coupled radio frequency plasma

Ho-Jun Lee*, Dong-yung Yi, Heung-Sik Tae**, Ki-Woong Whang**

Department of Electrical Engineering, Uiduk University

School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University

School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - Magnetic field is commonly used in low temperature processing plasmas in order to obtain high density. E x B magnetron or surface multipole configuration were most popular. However, the properties of capacitively coupled rf plasma confined by axially applied static magnetic fields have rarely been studied. In this paper, the effects of magnetic field on the characteristics of 13.56MHz/40KHz argon plasma will be reported.

Ion saturation current, electron temperature and plasma potential were measured by Langmuir probe and emissive probe. At low pressure region (~10mTorr), ion current was increased by a factor of 3 - 4 due to reduction of diffusion loss of charged particles to the wall. It was observed that magnetic field induces large time variation of the plasma potential. The experimental result was compared with particle-in-cell simulation. It was also observed that electron temperature tend to decrease with increasing magnetic induction level for 40KHz discharge.

1. 서 론

평판전극 형태의 용량결합 플라즈마 장치는 부가가치 박막제조 또는 반도체 식각공정 등에 광범위하게 응용되고 있으나, 플라즈마를 정화하고 유지시키려면 일반적으로 수 십 mTorr이상의 용기 압력이 필요하고, 낮은 압력에서는 플라즈마의 밀도가 낮아 높은 공정율을 기대하기 힘들다. 또한 과도한 자기 바이어스 전위에 의해 시료가 물리적 손상을 입는 등의 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 여러 형태의 외부 자장응용이 시도되었다. 용기주위에 표면 다극자장을 만들어 전자 손실을 줄이고 플라즈마 밀도를 증가 시키거나[1] Sheath 전계와 수직인 방향의 자계를 인가하여 방전효율을 높이고 자기 바이어스를 낮추는 E x B Magnetron 방전[2] 등이 그 대표적인 예이다. 그러나 축 방향의 자장으로 플라즈마 전체를 자화 시킨 경우에 대한 방전 특성연구나 응용은 별로 없는 실정이다.

본 논문에서는 자체 제작된 자체 용량결합형 플라즈마 발생장치에서 이온 전류, 전자 온도, 플라즈마 전위, 자기 바이어스 및 방전 전압측정을 통해 자장에 의한 플라즈마의 가동 현상이 방전 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

그림 1은 방전 용기 및 실험장치의 개략도이다. SUS 316 으로 제작된 주 방전용기는 터보 분자펌프(Turbo molecular pump) 및 로타리 펌프(Mechanical rotary pump)로 진공 배기되며 기저압력은 10^{-6} Torr로 유지된다. 두 전극간의 거리는 5.5cm, 전극들의 직경은 150cm이며 음극 쪽은 원하지 않는 ExB discharge를 피하기 위해 0.5cm의 간극을 가진 차폐 실린더로 둘러싸여 있다. 양극 쪽은 추후 Triode discharge 응용을 위해 플로팅 되어 있으며 Shower head형태로 방전 가스도입부를 결합하고 있다. 인가 RF 전력의 주파수는 주로 13.56MHz가 사용되었으며 전자온도 측정의 경우 40KHz 방전이 추가적으로 수행되었다. 플라즈마 용기 위, 아래에 내경 60cm, 외경 110cm인 솔레노이드 전자석이 Helmholtz 코일 형태로 배치되어 있다.

플라즈마 전위의 시 변동이 심한 시스템에서 Langmuir Probe로 전자온도를 측정할 경우 플라즈마와 탐침 사이에는 탐침에 인가된 Sweeping DC Voltage 이외에 공간전위의 시 변동분이 포함되어 있으므로 실제 온도 보다 크게 측정되는 경향이 있으며 [3] 이온 밀도는 실제보다 낮게 나타나게 된다. 이를 피하기 위해서는 탐침과 접지전위 사이의 임피던스를 최대한 증가시켜 공간전위의 변동분이 탐침probe에 걸리지 않도록 하거나 double probe를 사용하여 probe system을 floating 시킬 필요가 있다. 본 실험에서는 직경 150um의 floating double probe를 사용하여 전자의 온도 및 이온 포화전류를 구하였다.

플라즈마 전위 측정에는 직경 35um 텅스텐 선으로 제작된 Emissive Probe를 사용하였다. 자기 바이어스는 인덕터로 고주파 전류를 필터링한 후 1Mohm 저항을 통해 측정되었다.

2.2 실험결과 및 토의

2.2.1 이온전류밀도

그림 2는 Ar 플라즈마에서 이온 전류밀도의 자장의존성을 몇가지 방전 압력 조건에서 측정한 결과이다. 가장 낮은 압력인 10mTorr의 경우 자장이 인가됨으로서 0.4mA/cm²에서 1.3mA/cm²로 3배 이상 증가함을 확인할 수 있었다. 플라즈마 자장에 의한 밀도 증가의 효과는 크게 방전 압력과 전극의 간격 대 반경비 (Aspect ratio)에 의존한다. 약전리 플라즈마에서 자장

$$D_{\perp} = \frac{D}{1 + \omega_c^2 \tau^2} \quad (\omega_c$$

: cyclotron frequency, $1/\tau$: electron-nutrial collision frequency, D: diffusivity, kT/mv)로부터 자장효과와 압력의존성을 이해할 수 있다. 또한 Aspect ratio가 커질수록 전체 손실에서 반경반향으로의 이 손실 비율이 커지므로 자장의 효과 또한 커지게 된다. 압력이 낮아 질수록 방전을 유지에 필요한 극간 거리가 커지는 점을 고려하면 공정의 저압화에 축방향

자장의 인가가 상당히 유리함을 알 수 있다.

2.2.1 자기바이어스 및 플라즈마전위

용량결합형 플라즈마의 가장 큰 특징중의 하나는 자기 바이어스의 생성이며 이로 인해 음극에 입사하는 이온은 큰 에너지를 가지게 된다. 따라서 실제 응용을 고려할 때, 자기 바이어스의 크기는 공정의 특성을 좌우하는 중요한 변수가 된다. 전력이 인가되는 전극쪽에 바이어스가 걸리기 위해서는 전극 면적의 비대칭성과 직류 전류가 전체 방전 회로를 통해 인가되지 않도록 하는 저지 커패시터(Blocking Capacitor)가 있어야 한다. 두개의 마주보는 평판전극 사이에서 방전을 유지시킬 때에도 용기 전체가 Anode의 역할을 하므로 실제로는 전극의 면적비가 매우 커서 selfbias 전압 V_{dc} 는 거의 $V_{rf}/2$ 에 이르게 된다. 외부 자장의 크기와 압력이 증가함에 따라 selfbias가 감소함에 관측되었다. Selfbias가 압력에 따라 줄어드는 이유는 방전전압의 감소, 충돌 주파수 증가에 따른 전자 전류밀도의 저하와 실제적인 양극 면적의 감소등으로 생각된다. 자장에 따른 bias 감소 경향은 플라즈마의 속박으로 인한 방전의 대칭화 및 플라즈마 임피던스 감소에 따른 인가 RF전압치의 감소에 기인한 것으로 추정된다.

그림 3은 방전영역의 중심부에서 측정된 Plasma Potential(V_p)의 자장에 따른 변화를 보여준다. Emissive Probe 전류 전압 곡선 1계 미분값의 극대점으로부터 얻어진 플라즈마 전위는 자장이 인가되지 않은 경우 2개 존재하였으며 이는 주기적으로 변화하는 V_p 의 최대값(V_{pmax}) 및 최소값(V_{pmin})에 해당된다. 이때 V_p 값은 20 ~ 25V 사이에서 변화하였다. 자장이 강하게 인가된 경우는 $V > 0$ 에서 플라즈마 전위값이 잘 측정되지 않았으며 자장이 증가할수록, 측정된 V_p 는 감소하는 경향을 보여주었다. 특히 V_{pmin} 은 음의 값으로 크게 감소하여 V_p 의 시변동폭이 증가하였다. 통상의 저온 플라즈마에서는 이온에 비해 전자의 온도가 높고 질량이 낮기 때문에 플라즈마 전위는 일반적으로 주위를 둘러싸고 있는 용기보다 높게 유지된다. 자장의 영향으로 전자의 손실이 상대적으로 크게 감소하면 실험 결과에서처럼 V_p 가 음의 값을 가질 가능성이 있다. 그러나 자장이 인가된 상황에서도 상당한 negative DC self-bias가 형성된 결과를 고려하면 반경방향으로의 전자 손실감소가 음의 V_p 값을 설명하는 데는 충분치 않다고 생각된다. 또한 방전 형상의 변화와 floating된 anode의 영향으로 V_p 가 전체 시변동 주기의 일부분동안 음의 값으로 될 가능성도 있다. 자장에 의한 플라즈마 전위의 변화 특성을 좀 더 자세히 알아보기 위해 Particle-in-Cell simulation을 수행하였다. 시뮬레이션에는 berkeley 대학에서 개발된 X-window용 공개 code인 Xoopic (X-object oriented particle in cell)가 사용되었다. 이 code는 영역에 따라 field solver를 electro static 또는 electromagnetic으로 선택 할 수 있으며 2차원 공간 및 3차원 속도공간을 가지는 문제에 적용할 수 있다. 전극은 유전체내에 가상의 등전위면으로 되어 있어 시간경과에 따른 self-bias생성을 확인할 수 있도록 하였으며 측면은 도체, 양극쪽은 유전체 경계로 설정하였다. 전극 등전위면에 인가되는 전압은 $V_{sin} \omega t [V]$ 의 형태를 가지며 $V_0 = 50V$, 주파수는 20MHz로 설정하였다. 전압인가 지연시간을 T/4 만큼 주어 초기 플라즈마 전위가 형성된 후에 외부전압이 인가되도록 하였다. 전자의 초기온도 및 밀도는 각각 $5eV$ (등방성), $10^9/cm^3$ 으로 주었다. 이온의 온도는 $0.025eV$ 로 설정하였으며 초기밀도는 전자와 같다. 배경 중성기체는 10mTorr의 Ar이며 Monte-Carlo simulation을 통해 하전입자와 중성입자사이의 충돌이 고려된다. 축방향의 외부자장 크기를 제외한 다른 모든 조건은 동일하게 주었다. 실제의 경우는 방전영역, 전자온도등 여러 파라메타들이 다르지만 사용된 PIC 시뮬레이션이 주어진 방전

전력에 대해 입자, 에너지 보존식을 만족하는 self-consistence한 해를 구하는 것이 아니므로 자장의 유무에 따른 V_p 변화의 경향 파악정도의 의미를 가진다고 할 수 있겠다. 그림 4는 축방향 공간전위 분포의 시간에 따른 변화를 보여준다. 자화되지 않은 경우는 4 - 5 주기만에 전극과 유전체로 사이에 25V 정도의 DC 전압이 형성됨을 알 수 있다. sheath 이외의 영역에서 공간적으로 균일한 V_p 분포를 보여주고 있으며 DC bias가 생성된 이후 한 주기내의 V_p 시변동은 5V 정도를 유지한다. 반면 자장이 인가된 경우는 (그림5) V_p 의 최대, 최소값의 절대치가 자장이 인가되지 않은 경우에 비해 커지고, DC 바이어스의 생성이 상당히 미약하다. 또한 전극 전압이 음이되는 주기에서 V_p 가 음의 값을 가짐을 볼 수 있다. DC bias의 감소 및 V_p 의 시변동 폭 증가 및 V_{pmin} 이 음의 값을 가지는 현상은 시뮬레이션결과가 실험결과와 잘 일치하고 있으며 음의 V_{pmin} 값은 전압변동이 허용되는 플로팅된 양극과 B에 수직인 방향으로의 하전입자 운동이 제한됨에 따른 결과임을 알 수 있다. V_{pmax} 값은 시뮬레이션 결과와 측정치가 부합되지 않는데 그 이유는 emissive probe 측정에 있어서 과도한 electron collection current의 영향으로 추정된다.

2.2.1 전자온도변화

그림 6은 방전 주파수 13.56MHz 및 40KHz 에서 압력 및 자장의 변화에 따른 전자온도측정 결과이다. 압력이 증가함에 따라 모든 경우에서 온도의 감소가 관측되었고 40KHz에 비해 13.56MHz 방전의 경우 전자온도가 훨씬 높은 값을 보여준다. 하전입자 평형(particle balance)의 관점에서 보면 전자온도는 '손실율 = 생성율' 방정식으로부터 얻어지는데, 압력에 따른 전자온도의 변화는 이 식으로부터 쉽게 이해할 수 있으나 방전 주파수의 변화가 어떠한 경로로 전자온도에 영향을 미치는가는 아직 불분명하다. 40KHz 정도의 저주파 영역에서는 이온 플라즈마 주파수 및 sheath에서의 이온 전이 주파수(ion transit frequency)가 인가 전압의 주파수보다 훨씬 높아 플라즈마내의 모든 하전입자들이 전체의 변화를 잘 따라갈 수 있다. 따라서 방전유지 및 전자가 열 양상이 DC방전과 유사할 것으로 생각된다. 이런 경우, 음극에서 튀어 나와 sheath에서 가속되는 높은 에너지를 가진 이차전자가 방전유지에 중요하고 플라즈마 체적내에 있는 대부분의 전자는 양극성 확산에 의한 약한 전계에 의해 에너지를 얻는다. 반면 방전 주파수가 수 MHz이상의 경우는, 빠른 속도로 움직이는 sheath-plasma 경계에서의 비충돌성 전자가열이 가능하다. 13.56MHz 방전에서의 전자 온도가 상대적으로 높은 것은 이러한 전자가열 기구의 차이에 의해 부분적으로 기인하는 것으로 생각된다.

40KHz 방전에서 자장에 따른 전자온도 감소는 하전입자들의 속박으로 인한 자기 손실 면적의 감소로 잘 설명될 수 있다. 그러나, 예상과 달리 13.56MHz 방전의 경우는 자장이 인가됨에 따라 온도가 대체적으로 증가하였다. 이유는 아직 불분명하며 플라즈마 전위의 시변동 폭이 증가함에 따라 Langmuir probe i-v 특성에 공간전위의 시변도 성분이 포함되어 나타나는 측정상의 오차일 가능성도 배제할 수 없다.

3. 결 론

축방향 자장이 인가된 용량결합형 RF 플라즈마에서 자장이 플라즈마의 특성에 어떠한 영향을 미치는가 조사해 본 결과 저압에서 이온 포화 전류 밀도의 상당한 증가를 확인하였다. 자기 바이어스 전위의 감소, 플라즈마 전위의 시변동 폭 증가 및 저주파 방전에서의 전자온도 감소가 관측 되었다. 이러한 방전특성의 변화는 자장에 의한 전자의 반경방향 손실 감소 및 이에 따른 방전 형

상의 대칭화에서 파생됨을 알았다.

(참 고 문 헌)

[1] Rudolf Limpaecher and K.R. Mackenie *Rev. Sci. Instrum.* vol.44 no.6 726 (1973)
 [2] S.C. McNevin, N.A. Ciampa and J. Miner *J. Vac. Sci. Technol. A* 10(4) 1227 (1992)
 [3] V.A. Godyak, R.B. Piejak and B.M. Alexanderovich *Plasma Sources Sci. Technol.* Vol.1 36 (1992)
 [4] J.R. Smith, N. Hershkowitz and D. Coakley *Rev. Sci. Instrum.* 50(2) 210 (1979)
 [5] E.Y. Wang, N. Hershkowitz, T. Intrator and C. Foster *Rev. Sci. Instrum.* 57(10) 2425 (1986)
 [6] Peter M. Meijer and Willem Jan Goedheer *IEEE Trans. Plasma Sci.* vol.19 170 (1991)
 [7] Michael A. Lieberman *IEEE Trans. Plasma Sci.* vol.16 638 (1988)

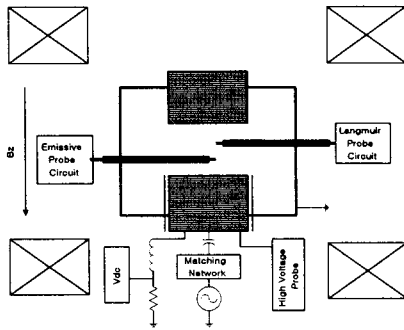


그림1. 시스템 개략도

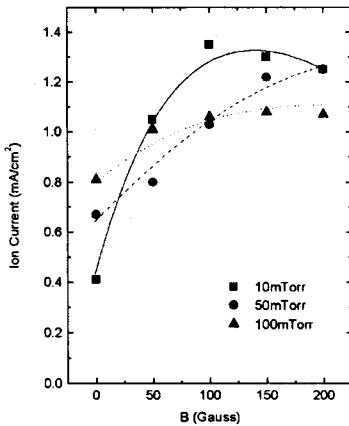


그림2. 자장에 따른 이온전류밀도 변화

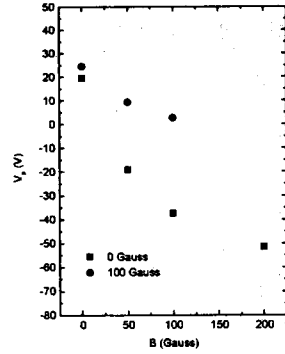


그림3. 자장에 따른 플라즈마전위 변화

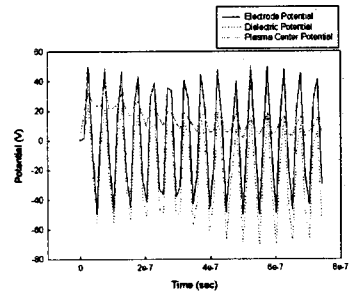


그림4. PIC로 계산된 Vp의 시변화(B=0G)

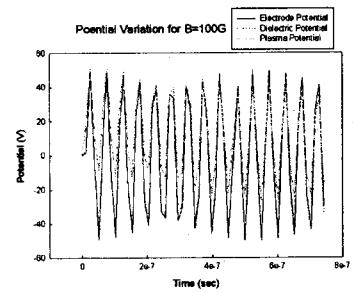


그림5. 그림3. PIC로 계산된 Vp의 시변화(B=0G)

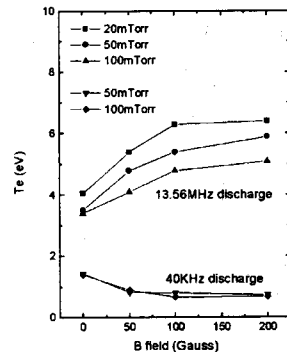


그림6. 자장에 따른 전자 온도 변화