

축 방향으로 자화된 용량 결합형 RF 플라즈마의 특성 연구

이호준 · 태흥식* · 이정해** · 신경섭*** · 황기웅****

부산대학교 전자전기정보컴퓨터 공학부, *경북대학교 전자전기공학부, **홍익대학교 전파공학과,
삼성전자 반도체 연구소 기술 개발부, *서울대학교 전기공학부
(1999년 12월 24일 접수)

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

Ho-Jun Lee, Heung-Sik Tae,* Jeong-Hae Lee,**
Kyung-Sub Shin,*** and Ki-Woong Whang****

Division of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University

*School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University

**Department of Radio Science & Communication Engineering, Hongik University

***Technology Development Department, R & D Center, Samsung Electronics CO. LTD.

****School of Electrical Engineering, Seoul National University

(Received December 24, 1999)

요약 - 본 논문에서는 축 방향으로 자화된 용량결합형 13.65 MHz/40 KHz RF 방전에서 Langmuir Probe, Emissive Probe를 통해 이온 전류 밀도, 전자 온도, 플라즈마 전위의 자장 의존성 및 자기 바이어스 전위를 조사하였다. 자장을 인가함으로써 실험변수 범위 내에서 최대 3배의 이온 전류밀도 증가를 얻었고 점화 가능한 기체 압력의 최저값을 줄일 수 있었다. 플라즈마가 자화된 경우 공간 전위는 평균적으로 감소하였고 RF전압의 한주기 동안 시 변동폭이 크게 증가하였다. 플라즈마 전위의 자장 의존성은 Particle-in-Cell Simulation을 수행하여 실험 결과와 비교하였다. 대표적 실험 조건에서 전자 온도는 자장에 따라 약 4 eV에서 5 eV로 약간 증가하는 경향을 보였으나 방전 주파수를 40 KHz로 줄인 경우 1.8 eV에서 0.8 eV로 감소하였다. 실험 장치의 응용 예로서 플루오로 카본 가스에 의한 식각실험이 수행되었다. 자화 플라즈마의 산화막 식각속도 증가를 확인함으로써 축방향 자장이 실제 공정에 긍정적인 영향을 미침을 확인 할 수 있었다.

Abstract - Magnetic field is commonly used in low temperature processing plasmas to enhance the performance of the plasma reactors. E x B magnetron or surface multipole configuration is the most popular. However, the properties of capacitively coupled rf plasma confined by axial static magnetic field have rarely been studied. With these background, the effect of magnetic field on the characteristics of capacitively coupled 13.56 MHz/40 KHz argon plasma was studied. Ion saturation current, electron temperature and plasma potential were measured by Langmuir probe and emissive probe. At low pressure region (~10 mTorr), ion current increases by a factor of 3-4 due to reduction of diffusion loss of charged particles to the wall. Electron temperature slightly increases with magnetic field for 13.56 MHz discharge. However, for 40 KHz discharge, electron temperature decreased from 1.8 eV to 0.8 eV with magnetic field. It was observed that the magnetic field induces large temporal variation of the plasma potential. Particle in cell simulation was performed to examine the behaviors of the space potential. Experimental and simulation results agreed qualitatively.

1. 서 론

평판전극 형태의 용량결합 플라즈마 장치는 부가가치 박막제조 또는 반도체 식각공정 등에 광범위하게 응용

되고 있으나, 플라즈마를 점화하고 유지시키려면 일반적으로 수십 mTorr이상의 용기 압력이 필요하고, 낮은 압력에서는 플라즈마의 밀도가 낮아 높은 공정율을 기대하기 힘들다. 또한 과도한 자기 바이어스 전위에 의

해 시료가 물리적 손상을 입는 등의 문제점이 있다. 이러한 문제들을 극복하기 위해 여러 형태의 외부 자장 응용이 시도되었다. 용기주위에 표면 다극자장을 만들어 전자 손실을 줄이고 플라즈마 밀도를 증가 시키거나[1] Sheath 전계와 수직인 방향의 자계를 인가하여 방전 효율을 높이고 자기 바이어스를 낮추는 E×B Magnetron 방전 [2]등이 그 대표적인 예이다. 그러나 축 방향의 자장으로 플라즈마 전체를 자화 시킨 경우에 대한 방전 특성연구나 응용은 별로 없는 실정이다.

이런 배경하에, 본 논문에서는 자체 제작된 자화 용량 결합형 플라즈마 발생장치에서 이온 전류, 전자 온도, 플라즈마 전위, 자기 바이어스 측정을 통해 자장에 의한 플라즈마의 감금 현상이 방전 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보았다. 제작된 플라즈마 발생장치의 응용으로서 CF₄ 방전에 의한 산화막 식각실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 방전 용기 및 실험장치의 개략도이다. SUS 316으로 제작된 주 방전용기는 터보 분자펌프(Turbo molecular pump) 및 로타리 펌프(Mechanical rotary pump)로 진공 배기되며 기압력은 10⁻⁶ Torr로 유지된다. 두 전극간의 거리는 5.5 cm, 전극들의 직경은 150 cm이며 음극 쪽은 원하지 않는 ExB discharge를 피하기 위해 0.5 cm의 간극을 가진 차폐 실린더로 둘러 싸여 있다. 양극 쪽은 추후 Triode discharge 응용을 위해 플로팅 되어 있으며 Shower head 형태로 방전

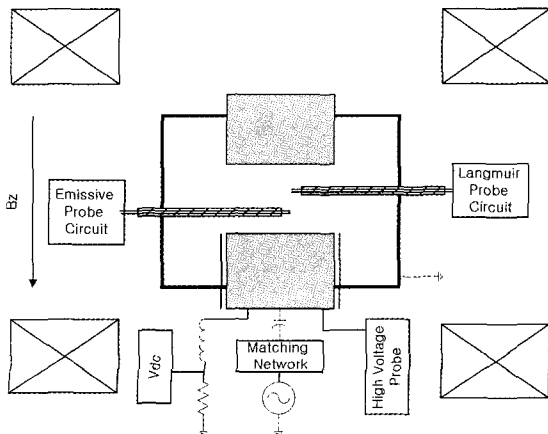


그림 1. 실험 장치의 개략도.

가스도입부를 겸하고 있다. 인가 RF 전력의 주파수는 주로 13.56 MHz가 사용되었으며 전자온도 측정의 경우 40 KHz 방전이 추가적으로 수행되었다. 플라즈마 용기 위, 아래에 내경 60 cm, 외경 110 cm인 솔레노이드 전자석이 Helmholtz 코일 형태로 배치되어 있다.

플라즈마 전위의 시변동이 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 실제 보다 낮게 나타나게 된다. 이를 피하기 위해서는 탐침과 접지전위 사이의 임피던스를 최대한 증가시켜 공간전위의 시 변동분이 탐침끝에 걸리지 않도록 하거나 double probe를 사용하여 probe system을 floating 시킬 필요가 있다. 본 실험에서는 직경 150 μm의 floating double probe를 사용하여 전자의 온도 및 이온 포화전류를 구하였다.

플라즈마 전위 측정에는 직경 35 μm 텅스텐 선으로 제작된 Emissive Probe를 사용하였다. Emission Current-Voltage 특성 곡선의 1계 미분 극대점 전위로부터 플라즈마 전위를 도출 하였다 [4, 5]. 자기 바이어스는 인덕터로 고주파 전류를 필터링한 후 1 Mohm 저항을 통해 측정되었다.

3. 실험결과 및 토의

3.1. 이온 전류 밀도

그림 2는 Ar 플라즈마에서 이온 전류밀도의 자장의존성을 몇가지 방전 압력 조건에서 측정한 결과이다. 가장 낮은 압력인 10 mTorr의 경우 자장이 인가됨으로서 0.4 mA/cm²에서 1.3 mA/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 자장에 수직인

방향으로의 확산계수 $D_{\perp} = \frac{D}{1 + \omega_c^2 \tau^2}$ (ω_c : cyclotron frequency, $1/\tau$: electron-neutral collision frequency, D : diffusivity, kT/mv)로부터 자장효과의 압력의존성을 이해 할 수 있다. 또한 Aspect ratio가 커질수록 전체 손실에서 반경반향으로의 손실 비율이 커지므로 자장의 효과 또한 커지게 된다. 압력이 낮아질수록 방전을 유지에 필요한 극간 거리가 커지는 점을 고려하면 공정의 저압화에 축방향 자장의 인가가 상당히 효과적이라 생

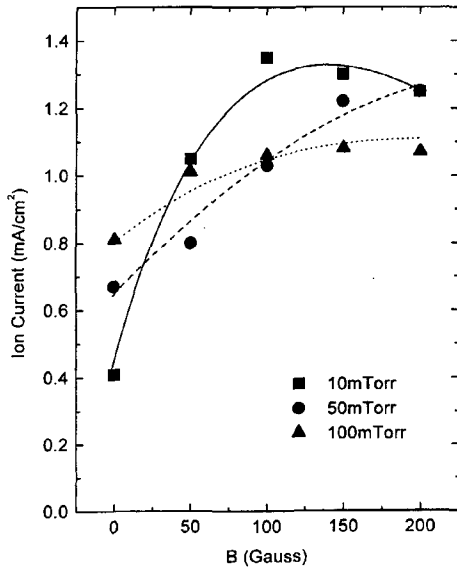


그림 2. 자장에 따른 이온전류밀도의 변화(RF power 100 W, Frequency 13.56 MHz, Ar discharge).

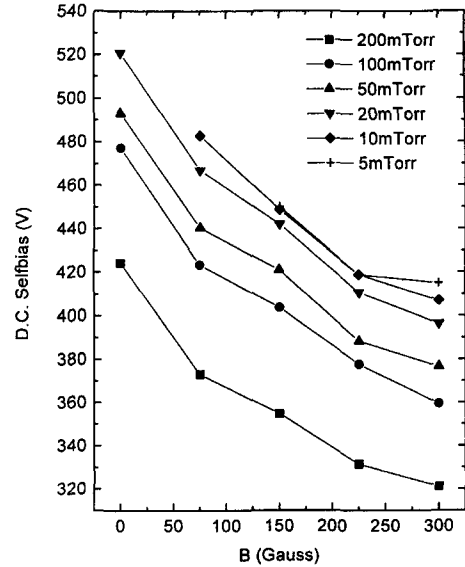


그림 3. Selfbias의 자장의존성(RF power 100 W, Frequency 13.56 MHz, CF₄ discharge).

각된다.

3.2. 자기 바이어스(Self-bias) 및 플라즈마 전위

용량결합형 플라즈마의 가장 큰 특징중의 하나는 자기 바이어스의 생성이며 이로 인해 음극에 입사하는 이온은 큰 에너지를 가지게 된다. 따라서 실제 응용을 고려 할때, 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. 그림 3은 CF₄ 플라즈마에서 방전 압력과 자장의 크기에 따른 selfbias 전압의 변화를 보여준다. 5 mTorr 및 10 mTorr 조건에서는 자장이 인가되지 않은 경우 플라즈마 접화가 이루어지지 않았으며 외부 자장의 크기와 압력이 증가함에 따라 selfbias가 감소하였다. 최저 점화 압력의 감소는 저압 동작에 있어서 자장의 유용성을 보여준다. Selfbias가 압력에 따라 줄어드는 이유는 방전전압의 감소, 충돌 주파수 증가에 따른 전자 이동도의 저하와 실제적인 양극

면적의 감소에 기인하는 것으로 생각된다. 자장에 따른 bias 감소 경향은 플라즈마의 속박으로 인한 방전의 대칭화 및 플라즈마 임피던스 감소에 따른 인가 RF전압치의 감소에 의한 것으로 추정된다.

그림 4는 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 [4]. 이 때 V_p 값은 20~25 V 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

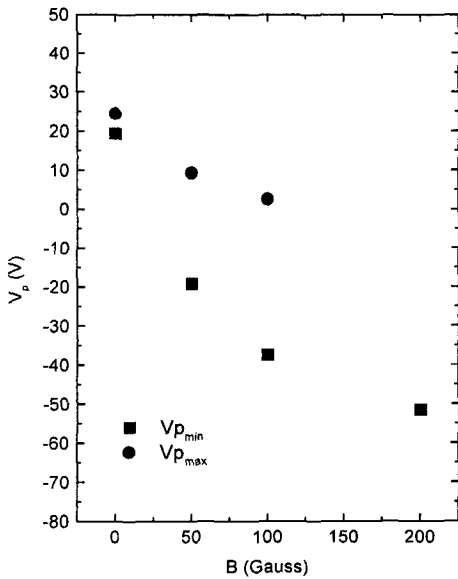


그림 4. Emissive Probe로 측정된 플라즈마 전위의 자장에 따른 변화(RF power 100 W, Pressure 10 mTorr, Frequency 13.56 MHz, Ar discharge).

생각된다. 또한 방전 형상의 변화와 floating된 anode의 영향으로 V_p 가 전체 시변동 주기의 일부분동안 음의 값으로 될 가능성도 있다. 그림 5는 반경 방향으로 V_p 변화를 측정된 결과이다. 자장이 없는 경우는 거의

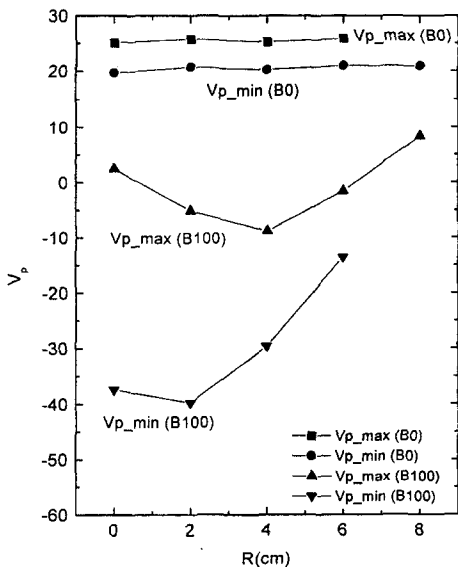


그림 5. 플라즈마 전위의 공간분포(RF 100 W, Pressure 10 mTorr, Frequency 13.56 MHz, Ar discharge).

일정한 값으로 유지되는 반면, 자장이 인가된 경우는 중심부에서 멀어질수록 V_{pmin} 값이 커지고 변동폭 또한 줄어들 수 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 electro-magnetic으로 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 $V_0 \sin \omega t$ [V]의 형태를 가지며 $V_0 = 50$ V, 주파수는 20 MHz로 설정하였다. 전압인가 지연시간을 T/4 만큼 주어 초기 플라즈마 전위가 형성된 후에 외부전압이 인가되도록 하였다. 전자의 초기온도 및 밀도는 각각 5 eV(등방성), $10^9/cm^3$ 로 주었다. 이온의 온도는 0.025 eV로 설정하였으며 초기밀도는 전자와 같다. 배경 중성기체는 10 mTorr의 Ar이며 Monte-Carlo simulation을 통해 하전입자와 중성입자사이의 충돌이 고려된다. 축방향의 외부자장 크기를 제외한 다른 모든 조건은 동일하게 주었다. 실제의 경우는 방전영역, 전자온도등 여러 변수들이 다르지만 사용된 PIC 시뮬레이션이 주어진 방전전력에 대해 입

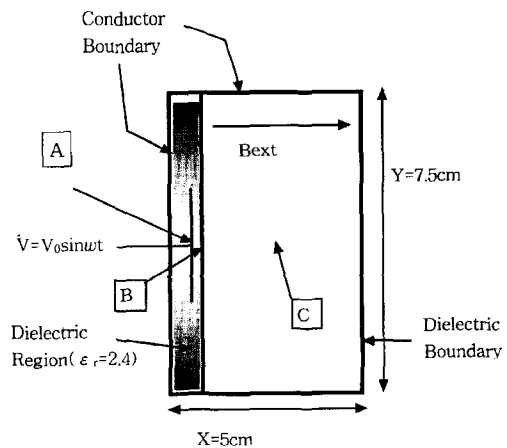


그림 6. Particle-in-cell Simulation에서의 계산 영역(Frequency 20 MHz, Initial electron and ion density $10^9/cm^3$, Initial electron temperature 5 eV (isotropic), Initial ion temperature 0.025 meV, Ar discharge, $V_0 = 100$ V).

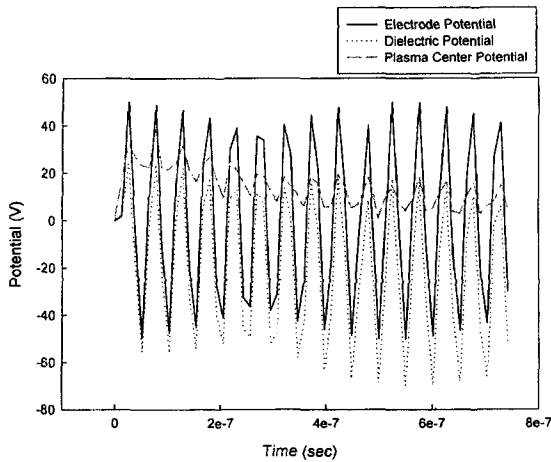


그림 7. 자화되지 않은 경우의 전극(그림 6의 A), 유전체 표면(그림 6의 B) 및 플라즈마전위(그림 6의 C)의 시변화 계산 결과.

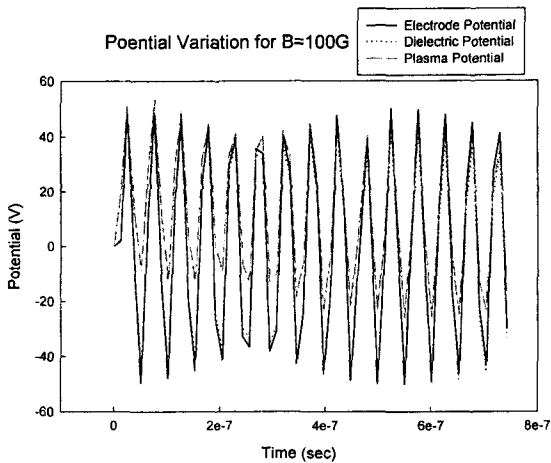


그림 8. 자화된 경우의 전극(그림 6의 A), 유전체 표면(그림 6의 B) 및 플라즈마전위(그림 6의 C)의 시변화 계산 결과.

자, 에너지 보존식을 만족하는 self-consistent한 해를 구하는 것이 아니므로 자장의 유무에 따른 V_p 변화의 경향 파악정도의 의미를 가진다고 할 수 있겠다. 그림 6은 계산 영역과 설정된 경계조건의 개략도이다. 그림 7은 $B = 0$ 인 경우 공간전위 분포의 시간에 따른 변화를 보여준다. 자화되지 않은 경우는 4~5 주기만에 전극과 유전체로 사이에 25 V 정도의 DC 전압이 형성됨을 알 수 있다. sheath 이와의 영역에서 공간적으로 균일한 V_p 분포를 보여주었으며 DC bias가 생성된 이후 한 주기내의 V_p 시변동은 5 V 정도를 유지한다. 반면 자

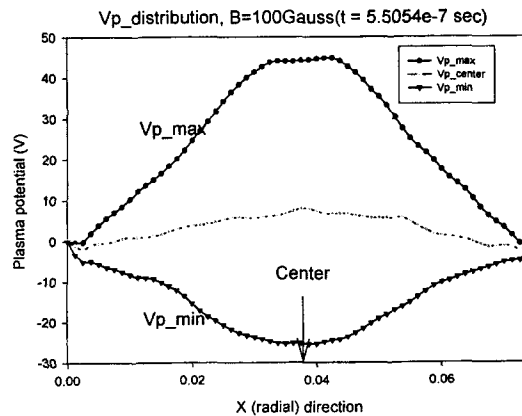
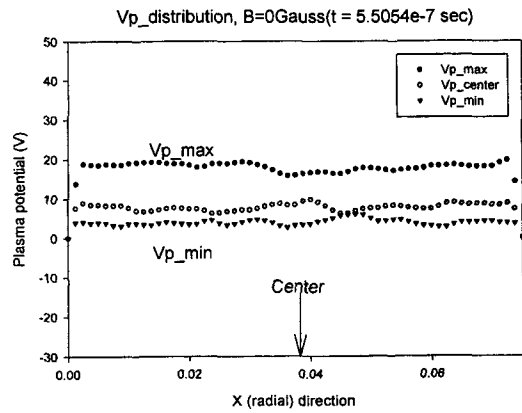


그림 9. 자장에 수직인 방향 (X, radial) 방향으로의 플라즈마 전위분포 계산 결과.

장이 인가된 경우는(그림 8) 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. 그림 9는 자장에 수직인 방향(X, radial direction)의 공간전위 분포의 시 변화 양상을 보여준다. $B = 0$ 인 경우 전체적으로 균일한 V_p 분포를 가지며, 자장이 인가된 경우 중심부로 갈수록 V_p 의 변동이 커지고 V_{min}

값이 감소한다. 이는 그림 5의 실험결과와 정성적으로 일치함을 알 수 있다.

3.3. 전자온도변화

그림 9는 방전 주파수 13.56 MHz 및 40 KHz에서 압력 및 자장의 변화에 따른 전자온도 측정 결과이다. 압력이 증가함에 따라 모든 경우에서 온도의 감소가 관측되었고 40 KHz에 비해 13.56 MHz 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. 40 KHz 정도의 저주파 영역에서는 이온 플라즈마 주파수 및 sheath에서의 이온 전이 주파수 (ion transit frequency)가 인가 전압의 주파수보다 훨씬 높아 플라즈마내의 모든 하전입자들이 전계의 변화를 잘 따라갈 수 있다. 따라서 방전유지 및 전자가열 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 전제에 의해 에너지를 얻는다. 반면

방전 주파수가 수 MHz이상의 경우는, 빠른 속도로 움직이는 sheath-plasma 경계에서의 비충돌성 전자가열이 가능하다 [6]. 13.56 MHz 방전에서의 전자 온도가 상대적으로 높은 것은 이러한 전자가열 기구의 차이에 의해 부분적으로 기인하는 것으로 생각된다.

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

3.4. 식각공정적용

플라즈마 특성의 변화가 실제 공정에 미치는 영향을 확인하기 위해 CF₄ 플라즈마에서 산화막 식각 실험을 수행하였다. 그림 11은 자장 인가에 따른 산화막 식각 속도의 변화를 보여준다. 10 mTorr의 저압 분위기에서 2배 정도의 식각 속도증가를 확인 할 수 있었다. 저온 플라즈마에 의한 식각의 기본 메커니즘이 이온의 도움에 의한 화학적 식각 (ion assisted chemical etching)임을 고려하면 식각속도를 제한하는 요소는 기판에 입사

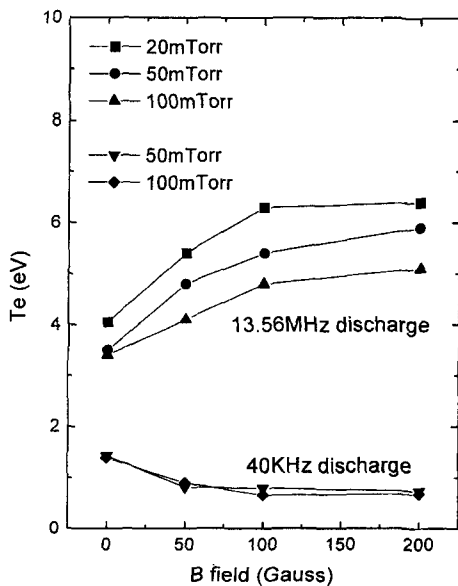


그림 10. 인가 자장 변화에 따른 전자온도의 변화(RF power 100 W (for 13.56 MHz), 50 W (for 40 KHz) Ar discharge).

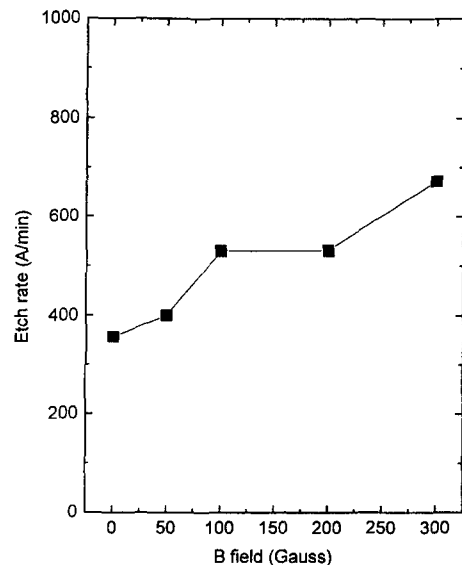


그림 11. 인가 자장에 따른 SiO₂ 식각속도 변화(CF₄ discharge, Pressure 10 mTorr, Flow rate 30 sccm, RF power 200 W, Frequency 13.56 MHz).

하는 중성 라디칼 flux, 이온 전류밀도 및 에너지의 세 가지로 크게 나누어 생각할 수 있다. Ar 플라즈마에서 이온전류밀도 측정 결과를 고려해보면 자장인가로 인한 이온전류 밀도의 증가와 자기바이어스의 감소는 각각 식각속도의 증가 및 감소를 초래하는 요인이 된다. 이온전류밀도는 1차적으로 플라즈마 벌크내의 하전입자 밀도에 의존하고 중성 라디칼은 주로 전자와의 충돌 해리에 의해 생성 되므로 이온 전류밀도 증가 경향으로부터 자장이 인가됨에 따라 F, CF_x와 같이 식각에 책임이 있는 중성종들의 밀도 역시 증가함을 유추해 볼 수 있다. 결과적으로 본 논문의 실험변수 영역 내에서는 식각속도 변화에 미치는 입사 이온 에너지의 감소 영향이 다른 요소들에 비해 크지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

축방향 자장이 인가된 용량결합형 RF 플라즈마에서 자장이 플라즈마의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 10 mTorr에서 2배 이상의 이온 포화전류밀도의 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 감소와 실제적으로 플라즈마와 접촉하는 양극의 면적이 음극의 면적과 같아지는

방전 형상의 대칭화에서 파생됨을 알 수 있었다. 이 장치의 응용 예로서 CF₄ 플라즈마에 의한 산화막 식각을 수행해 본 결과 현저한 식각속도의 향상을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 학술 진흥 재단의 과학 기술 기초 중점 지원(반도체분야: 과제번호 1998-016-E00016)으로 진행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Rudolf Limpaecher and K. R. Mackenie Rev. Sci. Instrum. **44**(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. **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] Michael A. Lieberman IEEE Trans. Plasma Sci. **16**, 638 (1988).