



직류 방전과 펄스 직류 방전에 의한 플라즈마 형상 관찰

양원균, 주정훈*

군산대학교 공과대학 신소재공학과, 플라즈마 소재 응용 센터

Observation of Plasma Shape by Continuous dc and Pulsed dc

Wonkyun Yang, Junghoon Joo*

Department of Materials Science and Engineering, Plasma Materials Research Center
 Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

(Received June 1 2009 ; revised June 16, 2009 ; accepted June 30, 2009)

Abstract

Effects of bipolar pulse driving frequency between 50 kHz and 250 kHz on the discharge shapes were analyzed by measuring plasma characteristics by OES (Optical Emission Spectroscopy) and Langmuir probe. Plasma characteristics were modeled by a simple electric field analysis and fluid plasma modeling. Discharge shapes by a continuous dc and bipolar pulsed dc were different as a dome-type and a vertical column-type at the cathode. From OES, the intensity of 811.5 nm wavelength, the one of the main peaks of Ar, decreased to about 43% from a continuous dc to 100 kHz. For increasing from 100 kHz to 250 kHz, the intensity of 811.5 nm wavelength also decreased by 46%. The electron density decreased by 74% and the electron temperature increased by 36% at the specific position due to the smaller and denser discharge shape for increasing pulse frequency. Through the numerical analysis, the negative glow shape of a continuous dc were similar to the electric potential distribution by FEM (Finite Element Method). For the bipolar pulsed dc, we found that the electron temperature increased to maximum 10 eV due to the voltage spikes by the fast electron acceleration generated in pre-sheath. This may induce the electrons and ions from plasma to increase the energetic substrate bombardment for the dense thin film growth.

Keywords: Bipolar pulsed dc, Plasma shape, CCP, Plasma modeling

1. 서 론

고출력을 이용한 고속 증착과 고주파를 이용한 박막의 성질 향상 등 플라즈마 특성 향상을 위해 전원 장치 개발이 지속적으로 추진되고 있다. 마그네트론 스퍼터링에서 금속 타겟을 이용한 반응성 산화물, 질화물 증착의 경우 타겟 표면의 비스퍼터링 지역 표면에 쌓이는 유전 물질의 양이 늘어나면 발생하는 아크가 큰 문제가 되고 있기도 한다. 이를 해결하기 위한 방법¹⁾의 하나가 고주파 스퍼터링을 하는 것이지만 전원 장치의 가격이 직류에 비해서 월등히 비싸고 매칭 네트워크를 추가하여야 하는 부담이 있다. 따라서 플라즈마 내부의 성질을 조

절하여 아크의 확률을 낮추고 또한, 플라즈마 특성도 향상시킬 수 있는 방법을 강구하게 되었고, 여기에는 부가적인 플라즈마, 이온빔 등을 이용하는 방법이 있고 증착에 사용되는 전원 자체의 성질을 개선하려는 노력을 하고 있다. 이 중 증주파수의 사인파를 이용하려는 노력과 같은 주파수대의 펄스 직류를 이용하려는 노력이 진행되고 있다²⁾. 펄스의 경우 단극성과 양극성으로 개발되어 있는데 이 다른 특성이 플라즈마 특성에 전혀 다른 영향을 주는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 현재 A사의 경우에는 350 kHz 까지 E사의 경우에는 250 kHz까지 개발되어 있다. 이를 이용한 플라즈마 진단 결과를 문헌에서 찾아 보면 펄스의 초기에 에너지가 높은 전자들이 발생하게 되고 주파수는 이 고속 전자들의 에너지 보다 발생 시간에 영향을 주는 것으로 나타나 있다³⁾. 즉,

*Corresponding author. E-mail : jhjoo@kunsan.ac.kr

펄스의 초기에 발생하는 순시 응답 특성에 의해서 플라즈마내의 높은 에너지 전자의 분을 변화가 생기고 이들이 기판에 입사하는 이온들의 에너지에 영향을 주게 된다는 것이다. 이들의 결과를 보면 펄스 주파수를 350 kHz까지 증가시키면 이온의 최대 운동에너지가 직류에 비해서 약 10배, 100 kHz에 비해서는 25% 증가하는 것을 알 수 있다. 최근 한 보고⁴⁾에 의하면 Al:ZnO 박막의 증착에서도 150 kHz에서 가장 낮은 비저항을 보이며 펄스 주파수를 250 kHz까지 증가시키면 다시 비저항이 증가한다고 한다⁴⁾. 펄스 주파수에 의한 증착연구는 이렇게 최근에 많이 시도되고 있지만, 식각에서는 아직 일반 직류나 RF를 이용한 공정이 대부분이다.

본 연구에서는 이 중 박막이 플라즈마의 하전 입자에 의한 충돌을 받는 정도를 가장 손쉽게 파악할 수 있는 방전 영역의 형성 관찰 방법을 통해서 직류와 중주파수 양극성 펄스 전원의 플라즈마 특성을 비교 관찰하였다. 그리고 수치 해석을 이용하여 전기장 해석 및 최종적으로는 플라즈마 모델링을 통하여 전자 온도 등의 플라즈마 특성에 대해서 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 방전 장치의 구성과 펄스 전원의 인가

본 연구는 정전용량결합 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma, CCP) 타입의 4인치 웨이퍼용 음극이 있는 식각장치이다. 진공 배기 시스템은 로터리 펌프(300 l/min, WSVP 9030)와 터보분자펌프(TMP, 140 l/sec, 5150CP, Alcatel)로 기본진공도는 1×10^{-7} Torr이고, 기판에 인가하는 전원장치는 직류 전원 공급 장치(MDX-1.5K, ADVANCED ENERGY)와 펄스직류전원 공급 장치(RPG-100, ENI)를 연결할 수 있게 되어 있다. 펄스직류전원 공급 장치는 50~250 kHz의 주파수를 조절할 수 있고, duty는 60~90%까지 조절이 가능하도록 되어 있다.

4인치 기판에 직류와 펄스직류를 공급했을 때 발생하는 플라즈마의 형상은 석영창을 통해 Digital Still Camera(DSC-P73, SONY)를 이용하여 관찰하고, 오실로스코프로 전압-전류 파형과 Optical Emission Spectroscopy(OES, SQ-2000, OceanOptics)를 이용하여 중성 Ar의 광학적 진단을 하였다.

2.2 전기장 해석 및 플라즈마 모델링

플라즈마 형상에 미치는 방전 조건의 영향을 조사하기 위한 1차 근사적 방법으로 플라즈마 영역을 일정한 유전율을 갖는다고 가정하고 쉬스를 무시한

채 일반적인 유한 요소 전기장 해석 소프트웨어 BELA를 이용하여 직류 전위 분포를 구해보았다. 그리고 상용 전산유체 프로그램인 CFD-ACE+를 이용하여 CCP를 transient 계산으로 펄스 직류일 때 발생하는 플라즈마를 모사하여 비교, 해석하였다. CCP 모드에서 전자 온도와 전자 밀도는 전자 수송 방정식(electron transport equation)과 전자 에너지 방정식(electron energy equation)으로 계산하고, 정전기장(electrostatic field)은 Poisson 방정식을 이용하여 얻는다. CCP 모드의 지배 방정식은 플라즈마와 쉬스 영역에 적용되며, Poisson 방정식은 아래와 같다⁵⁾.

$$-\nabla \cdot \epsilon \nabla \Phi = e \left(\sum_i q_i n_i - n_e \right) \quad (1)$$

ϵ : permittivity (F/m)

Φ : electrostatic potential (V)

e : electron charge (C)

q_i : ion species charge (C)

n_i : ion number density ($\#/cm^3$)

n_e : electron number density ($\#/cm^3$)

3. 실험 결과

3.1 직류와 양극성 펄스 방전의 음극 글로우 형상 변화

4인치 음극에 기판 없이 스테인리스(SUS)가 노출된 상태에서 직류전원과 펄스직류전원을 공급하고 그 때 발생하는 플라즈마에 의한 형상을 그림 1에 나타내었다. 직류방전의 플라즈마 발생은 주로 음극 면 앞의 쉬스에서 전자의 가속과 플라즈마 속에서 줄 가열(Joule heating)에 의해서 이루어진다. 하지만 이 방전은 주로 플라즈마에서 이온이 가속되어 음극 면과 충돌하면서 방출되는 2차 전자에 의해 유지되지만 이때의 2차 전자들의 양은 많지 않다⁶⁾. 그렇기 때문에 음극 면 앞의 쉬스에는 방전유지에 필요한 강한 전기장이 형성되고 그림 1(a)와 같이 10 W에서 400 V를 보였다. 음극 암영부로 나타나는 쉬스 영역도 확인 할 수 있었으며, negative 글로우 영역이 반구형(dome-type)으로 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 입력 전력이 커지면 밝은 부분인 글로우 영역이 넓어지고, 쉬스도 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 형상은 일반적으로 잘 알려져 있는 전압의 극성이 시간적으로 변하지 않고 일정하게 연속적으로 유지되는 직류에서는 전자들이 음극으로부터 양극인 챔버 벽면으로 퍼져나가는 것으로 생각할 수 있다.

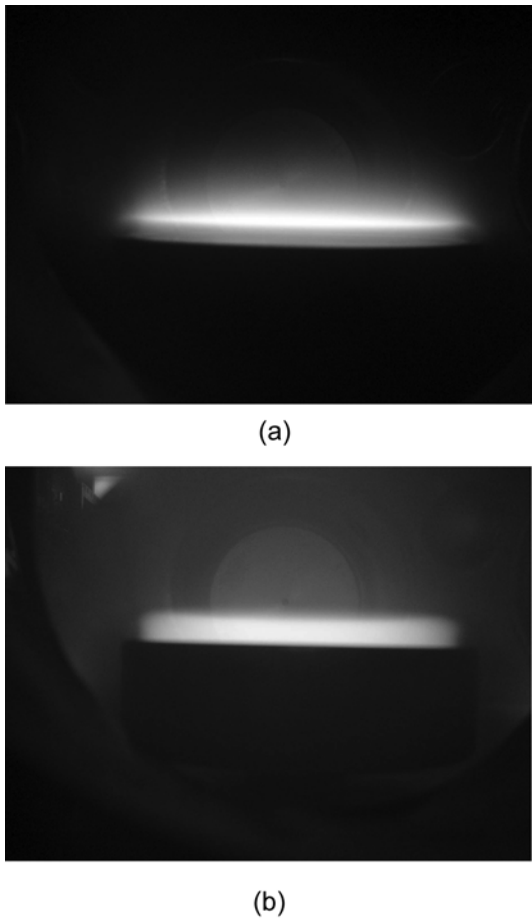


Fig. 1. Changing of cathode discharge shapes by (a) continuous dc and (b) pulsed dc.

반면에, 수백 kHz의 펄스직류방전에서는 일반 직류방전보다는 훨씬 낮은 압력에서 방전을 발생시킬 수 있었으며, 완전히 다른 형태의 플라즈마가 생성, 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 양극성 펄스는 파형관점에서 플라즈마를 켜고 끄는 것을 반복적으로 하지만, 실제로 전자나 이온의 생존시간(life time)에 의해 50 kHz 이상 주파수에서 플라즈마는 유지되고 있으며, 전자와 이온의 운동방향 또한, 음극주변에서 진동(oscillation)을 하게 되며, 이 때문에 직류방전과는 전혀 다른 형상의 플라즈마를 보여준다. 방전 전압의 증가에 따라 전자가 갖는 에너지도 증가하기 때문에 밝기도 밝아짐을 확인할 수 있었다. 또한, 주파수에 따라서도 플라즈마 영역이 변화했다. 같은 전력에서 주파수가 증가할수록 플라즈마 영역이 작아지지만 밝아지는 것을 확인했으며, 이것은 50 kHz에서는 한 주기가 20 μ s로 150 kHz일 때보다 3배 길기 때문에 전자가 음극으로부터 멀어지는 거리도 증가할 것이라 생각된다. 때문에 150 kHz일 때보다 플라즈마의 음 글로우도 두껍고 밝기도 어두운 것이라 판단된다.

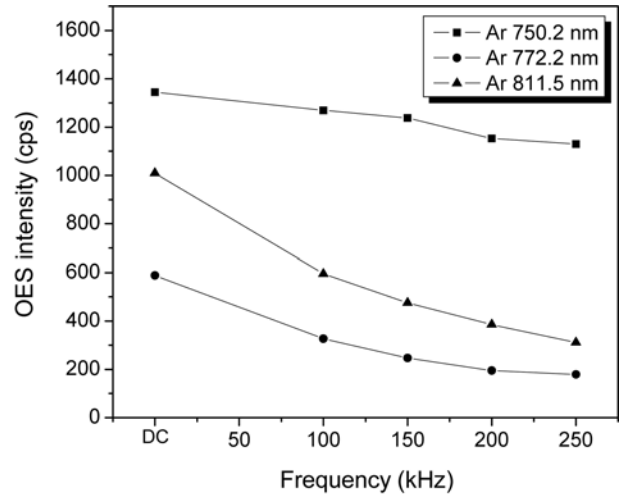


Fig. 2. Optical emission intensities of Ar by continuous dc and bipolar pulsed dc at various frequencies (100~250 kHz).

3.2 직류와 양극성 펄스 방전에서의 광학적, 정전기적 탐침에 의한 플라즈마 진단

일반 직류와 양극성 펄스 플라즈마의 특성을 해석하기 위해 OES를 통한 광학적 진단과 Langmuir probe를 이용하여 전자 온도, 전자 밀도를 측정하였다. 그림 2는 일반 직류의 쉬스는 펄스 방전에서의 쉬스보다 두껍기 때문에 동일한 위치에서 음 글로우 영역을 측정할 수 있는 한 점을 선정하여 OES를 측정했고, 중성 Ar 원자의 대표적인 750.2, 772.2, 811.5 nm의 파장을 추적하였다. 펄스 방전에서의 플라즈마는 직류 방전일 때보다 더 작고 조밀하기 때문에 선정한 측정 위치에서는 측정 강도가 직류 방전보다 펄스 방전에서 감소한다. 또한, 주파수가 증가할수록 플라즈마 영역이 더 작고 조밀해지므로 이 측정 위치에서 측정 강도는 감소한다. 주파수가 100 kHz에서 250 kHz로 증가할수록 750.2 nm 파장의 강도는 11%, 772.2, 811.5 nm에서는 약 46% 정도 감소한다. 또한, 직류방전과 100 kHz 사이에서도 750.2 nm는 6%, 다른 두 파장의 강도는 약 43% 정도 감소한다. 음극으로부터 특정한 높이에서 방전 주파수가 증가할수록 $3p^5(2p^0_{1/2})4p$ 인 11.82 eV의 여기 에너지를 갖는 750.2 nm는 다소 낮은 에너지 레벨인 $3p^5(2p^0_{3/2})4s$, 11.54 eV의 772.2, 811.5 nm에 비해 약간 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 음극으로부터 특정한 높이에서 방전주파수에 따른 전자 온도와 전자 밀도의 결과를 그림 3에서 보여주고 있다. 펄스 주파수가 증가할수록 육안으로 보이는 방전이 음극 쪽으로 작아지기 때문에, 특정 높이에서 측정된 결과는 주파수가 증가할수록 전자 밀도는 74%까지 급격히 감소하고, 전자

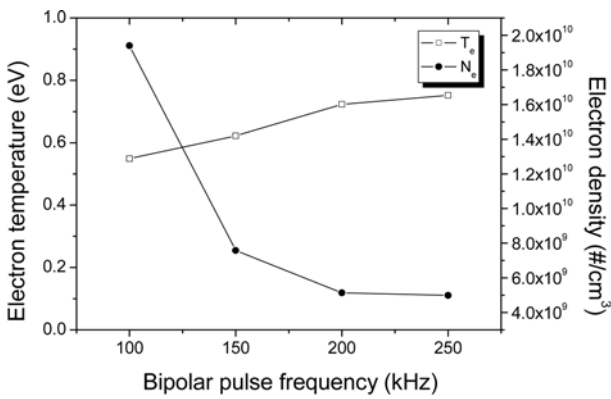


Fig. 3. Measured electron temperatures and electron densities by bipolar pulsed dc at frequencies (100~250 kHz).

온도는 36% 증가했다. 반대로, 주파수가 증가할수록 방전이 음극 쪽으로 작아지면서 밝아지는 것은 더 조밀해 지는 것으로 생각할 수 있으며, 때문에 현재 측정된 위치에서보다 더 음극 쪽으로 가까운 곳에서 측정하게 되면, 전자 온도는 감소하고 전자 밀도는 증가하는 경향을 보일 것이라 생각된다.

3.3 방전영역의 전기장 및 플라즈마 거동에 대한 수치해석

실험을 통한 직류방전과 펄스직류방전의 플라즈마 형태의 차이를 수치해석을 통해 알아보았다. 우선 직류방전의 경우, 일반적인 연속성 직류이고 자기장에 대한 영향이 없기 때문에 유한요소해석 소프트웨어인 BELA로 전기장을 해석하였다. 그림 4와 같이 본 연구에 사용된 시스템을 2차원으로 그리고, 음극표면에 직류 600 V를 인가하였다. 챔버 내부의 공간은 진공으로 가정하였고 플라즈마의 특성인 전도성과 교류 저항 성분은 고려하지 않았다. 전기장의 분포가 직류 플라즈마 방전 형상과 거의 흡사함을 알 수 있다. 자기장 영향을 받지 않는 음극에 연속적인 직류만 인가했을 때는 이러한 전기장 시뮬레이션만으로도 플라즈마 형상을 상당히 유사하게 예측할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

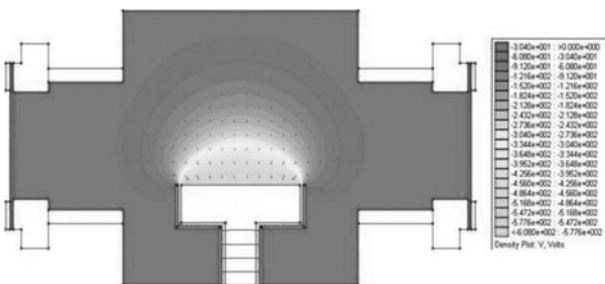


Fig. 4. Calculated electric potential distribution of dc discharge with vacuum condition.

3.4 유체 코드를 이용한 펄스 직류 플라즈마 모델링

CFD-ACE+를 이용하여 펄스 직류가 인가된 CCP 형태의 반응기에 대한 플라즈마 해석을 하였다. 전자 밀도에 대해서는 drift diffusion 식을 이용하였고 전자 온도는 식 (4)의 에너지 평형식과 식 (5)의 전기장 방정식을 이용하였다.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_e = S \tag{2}$$

$$\vec{\Gamma}_e = \mu_e n_e \nabla \phi - D_e \nabla n_e \tag{3}$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_e T_e) + \nabla \cdot \left(\frac{5}{2} T_e \vec{\Gamma}_e - \frac{5}{2} n_e D_e \nabla n_e \right) = \vec{j}_e \cdot \vec{E} - n_e \sum_n N_i K_i \tag{4}$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \tag{5}$$

- n_e : electron density (#/cm³)
- $\vec{\Gamma}_e$: electron flux (#/cm² · sec)
- S : electron source term (#/cm³ · sec)
- μ_e : electron mobility (cm²/V · sec)
- ϕ : electrostatic potential (V)
- D_e : electron diffusivity (cm²/sec)
- T_e : electron temperature (eV)
- \vec{j}_e : electron current density (mA/cm²)
- \vec{E} : electric field vector (V/m)
- N_i : mole fraction of i-th reaction
- K_i : reaction constant for i-th reaction
- ϕ : electric potential (V)

전기장, 전자 밀도, 전자 온도에 대한 시간 차분은 1 ns, 유동장, 입자 농도에 대한 식은 10⁻⁵ sec를 이용하였다. 전자 화학 반응은 Ar에 대해서 이온화, 탄성 충돌, 준안정원자 생성 충돌, 전자 준위 여기 충돌을 전자충돌 단면적을 문헌에서 구하고 Maxwellian분포를 가정하여 고려하였다. 펄스 전원의 경우 반복 주파수는 50-250 kHz로 낮으나 펄스 상승 시간이 전체 주파수에 비해서 월등히 빠른 0.1-0.4 μs로 유지하는 경우 높은 에너지의 전자를 펄스의 음전위 시작 시 생성 시킬 수 있다. 모델링에서는 펄스 상승 시간에 따른 플라즈마 특성, 즉 전자 온도, 전자 밀도, 플라즈마 전위 분포에 대해서 계산하였다. 모델의 기하학적 구조는 평행 평판으로 전극간 거리는 60 mm로 고정하였고 2차원으로 계산하였다. 이는 실험 장치에 전극과 가장 가까운 상부 챔버 부분만을 고려한 것이다.

그림 5에 250 kHz에서 50%의 duty를 갖으며 펄스 상승 시간을 0.1 μs로 설정한 경우의 계산 결과

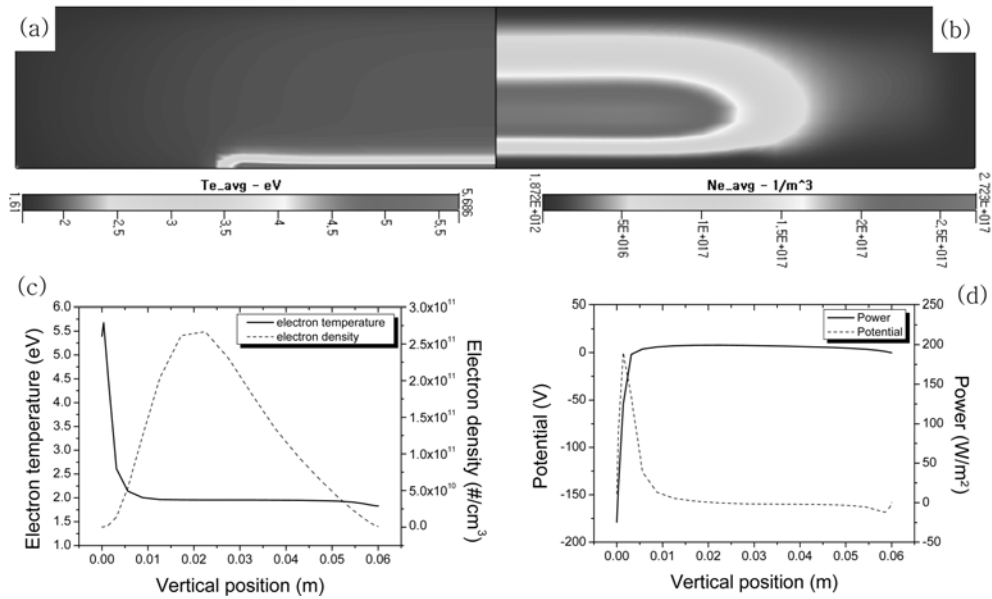


Fig. 5. Numerical modeling results (a) time averaged electron temperature, (b) time averaged electron density, (c) electron temperature and density along vertical direction, (d) electric potential and power density along vertical direction.

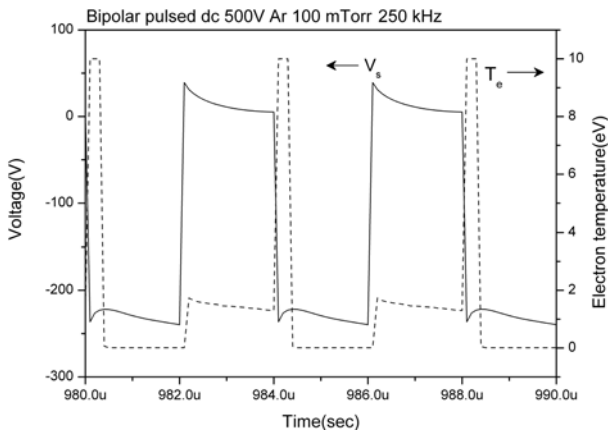


Fig. 6. Modeled results of electric potential and electron temperature variation over time by bipolar pulsed dc of 500 V and 250 kHz at 100 mTorr of Ar discharge.

를 나타내었다. 시간에 대한 평균값으로 표시한 전위 분포에서 음극(전력 공급 전극)의 쉬스 두께는 약 5 mm이며 프리쉬스(pre-sheath)는 17 mm로 계산 결과에서 추정할 수 있다. 펄스에 대한 순시값의 변화를 보기 위하여 시간 차분을 10 ns로 해서 저장한 데이터를 분석해보면 전극에 -250 V의 펄스가 인가되었을 때의 전자 온도는 최대 10 eV까지 상승하는 것을 알 수 있다⁷⁾(그림 6). 프리쉬스 지역에서 이러한 spikes 때문에 빠른 전자 가속이 발생할 것이고, 따라서 가스의 더 효율적인 이온화와 플라즈마 내에서 훨씬 더 높은 충돌률이 예상된다⁸⁾. 물론 이 때의 전체 부피에 대해서 평균한 전자 밀도는

그리 크게 증가하지는 않는다. 그러나 음극 쉬스 주변의 전자 온도가 증가하므로 높은 전자 온도에 의해서 가장 크게 영향을 받을 이온화 반응, 해리 반응이 중요한 공정에서는 펄스의 상승 시간을 빠르게 조절하는 것이 중요한 공정 인자가 된다. 실제로 측정된 펄스 전압, 전류의 형상을 살펴보면²⁾ (+)로 인가하는 역전위 부분의 상승 시간은 아주 빠른 반면 (-)로 내려가는 음전위 상승 시간은 여러 개의 사인파의 중첩으로 이루어진 것을 알 수 있다. 여기서 인용한 실험 결과는 마그네트론 음극에 인가한 펄스 직류에 대한 전압, 전류 파형이므로 본 실험과 정확히 일치하는 조건은 아니다. 전산 모사에서 전극에 (+)의 역전압을 인가했을 때의 시간에 따른 전자 온도의 변화를 살펴볼 필요가 있는데, 이는 피크 에너지를 갖는 전자들의 영향이 오히려 아킹의 발생 확률을 증가시킬 수 있는 가능성이 있기 때문이다. 실제로 이와 같은 시각에서 이중 마그네트론 음극을 설치하고 양쪽에 위상이 180° 차이 나는 펄스 직류 전압을 이용하여 미소 아킹을 줄여서 반응성 증착된 Al₂O₃ 박막의 조직이 치밀하면서도 아킹에 의한 조대한 입자의 발생이 극히 억제된 결과를 보고한 예가 있다⁹⁾. 이 경우에도 펄스 주파수가 150 kHz에서 더 좋은 결과를 보이고 있다. 전압의 오버 슈트가 (+)쪽과 (-)쪽 모두 존재하는데 전자 온도는 (-)쪽의 음전압이 인가될 때 치솟는 현상이 발생한다. 양극성 직류 전원 장치의 구동 방식에 전압을 펄스로 구동하는 방식과 전류를 펄스로 구동하는 방식으로 나뉘는데 본 연구에 사용한

ENI RPG-100은 전류형 구동 방식을 택하고 있다. 이러한 양극성 직류 전원 장치를 이용한 증착 공정에서 양극 전압에 의한 영향으로 효과적인 기관 충돌이 흡착원자(adatom)의 표면에서 이동도를 증가시키므로 조밀한 박막 형성을 향상시킨다는 보고도 있다¹⁰⁾. 하지만, 일반 직류일 때처럼 실험결과와 수치해석의 결과가 펄스의 경우 잘 맞지 않고 있다. 현재 이 부분에 대해서 계속해서 연구가 진행 중이며, 앞으로 Ar 뿐만 아니라 N₂, O₂, H₂ 등의 다양한 가스의 해리도 및 기타 특성 등에서도 추가 연구가 필요할 것이라 생각한다.

4. 결 론

박막이 플라즈마의 하전 입자에 의한 충돌을 받는 정도를 가장 손쉽게 파악할 수 있는 방전 영역의 형성 관찰 방법을 통해서 직류와 증주파수 양극성 펄스 전원의 플라즈마 특성을 플라즈마 형상과 광학적, 정전탐침 진단방법으로 비교 관찰하고, 수치 해석을 이용하여 전기장 해석 및 플라즈마 모델링을 통하여 전자 온도 및 플라즈마 특성을 관찰하였다. 마그네트론이 아닌 일반 음극에서 일반 직류로 방전시켰을 때는 음 글로우 영역이 반구형으로 형성이 되었으며, 음극 압영부로 나타나는 쉬스도 압력과 입력 전력에 대해서 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 수백 kHz의 양극성 펄스 직류로 방전시키면, 파형관점에서 플라즈마를 켜고 끄는 것을 반복함으로써 전자와 이온의 운동 방향 변화 및 진동이 음극 주변에서 발생하면서 원기둥 형태의 음 글로우 영역이 발생함을 알 수 있었다. 주파수가 증가하면 음 글로우 영역이 작아지면서 조밀해지는 것을 밝기로 알 수 있었고, 이것을 일반 직류와 양극성 펄스 직류에 의한 방전을 한 위치에서 측정할 수 있는 특정 위치에서의 OES intensity와 Langmuir probe를 이용한 전자 온도, 전자 밀도로 플라즈마 특성 변화를 측정하였다.

또한, 유한요소해석 소프트웨어를 이용하여 일반 직류 방전일 때의 방전 형상이 전기장 분포와 흡사

함을 확인할 수 있었고, 양극성 펄스 직류에 의한 방전은 2차원 CCP 수치해석을 통해 조사하였다. 250 kHz에서 50%의 duty를 갖는 모델에서 쉬스 두께는 8 mm, 프리 쉬스는 17 mm로 계산되었으며, 펄스가 인가되는 순간에 전자 온도가 최대 10 eV까지 상승함을 알 수 있었다. 이러한 역전위, 음전위의 상승시간 등이 중요한 공정 인자가 될 것이며, 이것이 효과적인 기관 충돌을 유발하여 박막에도 많은 영향을 줄 것이라 생각한다. 또한, 플라즈마 형상에서 볼 수 있듯이 식각, 증착 공정에서 양극성 펄스 직류 방전이 좋은 균일도를 보일 것이라 기대한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. P. J. Kelly, R. D. Arnell, J. Vac. Sci. Technol., A, Vac. Surf. Films, 17 (1999) 945.
2. R. D. Arnell, P. J. Kelly, J. W. Bradley, Surf. Coat. Technol., 188 (2004) 158.
3. W. D. Spoul, J. Vac. Sci. Technol., A, Vac. Surf. Films, 21 (2003) S222.
4. 양원균, 주정훈, 한국표면공학회지, 40(5) (2007) 209.
5. CFD Research, CFD-ACE Module Manual V2007 Vol.2., (ESI CFD Inc., Huntsville, Al, 2007), p. 115.
6. 김곤호, 양성채, "플라즈마 일렉트로닉스", 교학사 (2006) 108.
7. C. Corbella, M. C. Polo, G. Oncins, E. Pascual, J. L. Andujar, E. Bertran, Thin Solid Films, 482 (2005) 172.
8. I. Safi, Surf. Coat. Technol., 127 (2000) 203.
9. J. O'Brien, P. J. Kelly, Surf. Coat. Technol., 142 (2001) 621.
10. H. Bartzsch, P. Frach, K. Goedicke, Surf. Coat. Technol., 132 (2000) 244.