

수치모형을 이용한 pulsed dc bias ICP장치의 플라즈마 특성 해석

주정훈*

군산대학교 공과대학 신소재공학과, 플라즈마 소재 응용 센터

Numerical Modeling of Plasma Characteristics of ICP System with a Pulsed dc Bias

Junghoon Joo*

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

(Received April 26, 2010 ; revised June 15, 2010 ; accepted June 29, 2010)

Abstract

Numerical analysis is done to investigate the effects of pulse bias on the plasma processing characteristics like ion doping and ion nitriding by using fluid dynamic code with a 2D axi-symmetric model. For 10 mTorr of Ar plasma, -1 kV of pulse bias was simulated. Maximum sheath thickness was around 20 mm based on the electric potential profile. The peak electron temperature was about 20 eV, but did not affect the averaged plasma characteristics of the whole chamber. Maximum ion current density incident on the substrate was 200 A/m^2 at the center, but was decreased down to 1/10th at radius 100 mm, giving poor radial uniformity.

Keywords: Inductively coupled plasma, Uniformity, Fluid simulation, Pulse bias

1. 서 론

유도 결합 플라즈마는 저압에서 고밀도의 플라즈마 상태를 만들 수 있는 점 때문에 반도체 식각, 증착, 도핑, 표면 처리 등의 분야에 널리 사용되고 있다¹⁾. 안테나가 챔버 내부에 있는 경우의 전력 전달 효율은 외부에 있는 경우보다 좋다. 이 점을 적극 이용한 시스템들이 금속 박막의 스퍼터링 증착, 화학 기상 증착, 질화 등에 이용되고 있다. 안테나의 형상이 플라즈마의 균일도에 미치는 영향이 가장 크므로 다양한 형태가 시도되고 있다. 일자형, U자형 등의 기본형과 전체적인 인덕턴스를 낮추기 위한 머리빗 모양의 다중 연결 방식 등이 있다²⁾. 대면적에서 균일도를 확보하기 위하여 다양한 플라즈마 발생원이 시도되고 있으며 가장 널리 사용되어 온 평판형 용량 결합 플라즈마원이 정상과 효과 때

문에 문제가 되고 있어서 LCD(liquid crystal display)기판 8세대 이후에는 ICP와 CCP의 대면적 균일도의 경쟁이 다시 시작되고 있다. 이점에서 ICP는 CCP 대비 플라즈마 밀도를 최대 100배까지 증가시킬 수 있으므로 증착, 식각 속도 면에서 유리하므로 7세대급 이전의 장비 개발에서 상대적으로 불리한 위치에 있었던 ICP가 다시 많은 관심을 끌고 있다. 식각의 경우 라디칼에 의한 식각과 이온에 의한 식각으로 나눌 수 있으며 실리콘 산화막의 경우 후자에 해당한다. 이때의 식각 균일도는 중성 기체의 유동장과 이온 플럭스에 의해서 결정되는데 기판에 인가하는 바이어스가 입사하는 이온의 에너지를 좌우하며 균일도를 결정짓는 중요한 요소가 된다. 플라즈마 도핑³⁾시의 펄스 전압 형태가 중요한 부분이지만 쉬스 내에서 발생하는 이온-중성간 충돌에 의해서 입사각의 분포가 넓어지는 문제를 방지하기 위하여 낮은 압력에서 플라즈마를 유지시키려고 한다. ICP의 경우 낮은 압력(<5 mTorr)에서

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

는 방전 개시가 어려운 문제가 있으나 이온과 전자의 확산을 통한 플라즈마 균일도의 확보 측면에서는 유리한 측면이 있다. 본 연구에서는 ICP에 펄스 직류 바이어스를 인가했을 때 발생하는 전자 온도, 밀도, 플라즈마 전위의 변화에 대해서 수치 모델을 통하여 고찰하였다.

2. 계산 방법

수치 모델에 사용된 상세한 식은 문헌에 나와 있다⁴⁾. 가장 기본적인 것은 유체에 대한 유동 방정식이며 나머지는 전기장, 자기장에 대한 맥스웰 방정식과 전자 온도에 대한 미분 방정식으로 이루어져 있다. 전자 에너지의 분포는 맥스웰 형태를 가정하였으며 여기서 전자의 확산 계수, 이동도, 전자 관련 반응 계수가 구해진다. 전자와의 충돌 단면적을 이용하여 위의 계수를 구하였으며 실린더 모양의 챔버를 가정하고 벽면에 3회의 ICP 안테나가 설치된 형상에 대해서 수치 모델을 하였다. 기판에 인가하는 펄스의 형상은 가장 단순한 형태로 휴지기와 펄스 듀티, 그리고 상승, 하강 부분으로 구별된다. 주파수가 수 kHz로 낮고 상승, 하강 시간은 수 μ s로 빠른 편이다. 대개 플라즈마 도핑이나 질화에는 분자 가스를 사용하므로 여러 종류의 이온들이 생기는데 이들의 이동도가 다른 경우 즉, 이온 - 중성 충돌 확률이 많이 다른 경우에는 공간적인 분포의 불균일이 생길 수 있다. 질화의 경우 피처리물 표면에 생성되기 쉬운 산화물을 적절히 환원 시켜 줄 수 있는 수소 원자 및 분자 이온의 플럭스가 중요하며 플라즈마 도핑의 경우 이온의 에너지 분포와 입사각 분포가 중요하다. ICP를 사용하지 않고 CCP 만으로 이온 주입을 하는 경우에는 압력을 낮게 유지 할 수 없는 점이 가장 큰 단점으로 생각된다. 가장 중요한 공정상의 관리 문제인 아킹 확률을 낮출 수 있는 근본적인 장치 설계와 전원 특성 조절이 필요하다. 본 계산 모델에서는 실린더형 챔버의 외벽에 설치한 3회의 유도 결합 코일에 흐르는 전류가 모두 동일하다는 가정 아래 계산하였고 챔버는 전도체로 접지된 상태로 모델링하였다. CFD-ACE+는 유동 및 기타 모듈의 계산에 사용하는 시간 스텝과 플라즈마 모듈의 계산에 사용하는 시간 스텝이 완전히 독립적으로 되어 있다. 실험 조건에 따라서 상승 시간을 충분히 분해할 수 있고 ICP의 기본 주파수인 2 MHz를 분해할 수 있는 시간 스텝을 사용하였다. 이온 입사각 분포의 경우에는 독립적인 모듈을 작성하여 이온의 출발 위치, 이온 비행시간 동안의 충돌 과정에 대한 몬테카를로 전산

모사를 거쳐야 구할 수 있으며 이는 추후의 연구에서 진행할 예정이다.

3. 계산 결과 및 고찰

기판에 인가하는 전압 펄스의 시간에 따른 변화 구조를 그림 1에 나타내었다. 본 연구에 사용한 펄스 바이어스 주파수는 수 kHz로 유도 결합 플라즈마 발생원의 수 MHz보다는 1/1000 정도 낮은 주파수이다. 따라서 기판에 입사하는 이온의 에너지 분포는 바이어스의 전압을 직류로 인식하는 펄스 on time에 의존하게 된다. 단, kV 수준의 큰 음의 바이어스가 인가되는 펄스 상승 시간이 수 μ s로 짧으므로 이때의 물리적 현상은 전자와 이온의 거동에 모두 영향이 큰 수 백 kHz 대역의 주파수에 등가적이다.

축대칭 2차원 ICP의 전자 온도 및 밀도 분포를 그림 2에 나타내었다. 펄스 바이어스가 없는 일반적인 경우와 동일한 분포를 보이고 있으며 Ar의 압력이 10 mTorr로 낮은 편이어서 전자 온도가 2.4 eV로 계산되었다. 챔버의 벽면은 접지된 금속이라고 가정하였으므로 플라즈마 전위도 최고 16 V로 낮

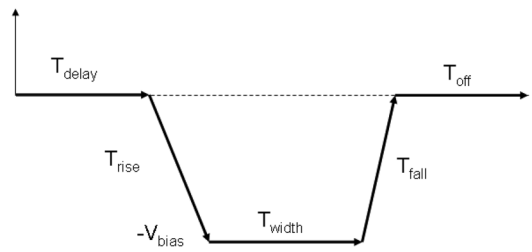


Fig. 1. The time configuration of a pulse bias.

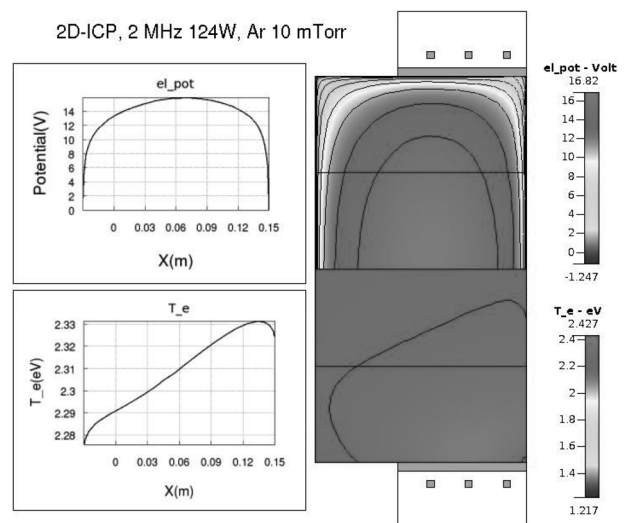


Fig. 2. Electron temperature and density profile with only ICP is turned on (2 MHz, Ar 10 mTorr).

으며 기판 주변이나 챔버 벽면 주위에서도 완만한 경사를 보이고 있다. 전력 흡수 계산에 가장 중요한 변수인 전자의 충돌 주파수는 탄성, 비탄성, Coulomb 충돌을 모두 고려하여 아래 식과 같이 구하였다. 실제로는 탄성 충돌에 대한 단면적이 다른 여타의 비탄성, Coulomb 충돌에 비해서 월등히 크므로 가장 지배적인 요인이며 기체 유동에 의한 압력 분포가 곧바로 전력 흡수에 영향을 미치게 되지만 10 mTorr 정도의 낮은 압력에서는 챔버 내의 압력 편차가 그리 크지 않다. 따라서 안테나에 의한 유도 전기장의 세기 분포가 1차적으로 전력 흡수 밀도를 결정하게 되고 전자와 이온의 확산에 의한 분포가 부차적으로 플라즈마 밀도 분포를 결정한다. 플라즈마 내의 각 종의 가스 입자에 대한 탄성 및 비탄성, Coulomb 충돌을 포함한 전자의 충돌 주파수는 다음과 같이 정의된다.

$$v_m(\epsilon) = v_e(\epsilon) \left\{ \sum_s n_s (\sigma_{el}^s(\epsilon) + \sigma_{inel}^s(\epsilon)) + n_e \frac{\sigma_{ei}(\epsilon)}{\gamma_E} \right\} \quad (1)$$

- $v_e(\epsilon)$: electron velocity
- n_s : density of neutral species s
- $\sigma_{el}^s(\epsilon)$: elastic electron momentum transfer cross section
- $\sigma_{inel}^s(\epsilon)$: inelastic cross section for neutral species s
- $\sigma_{ei}(\epsilon)$: electron-ion Coulomb collision cross section
- γ_E : the ratio of conductivity in a fully ionized plasma to that in a Lorentz gas (0.582)

계산 결과에서 전자 온도는 2.2-2.4 eV로 전 공간에 걸쳐서 비교적 균일한 편이다. 펄스 바이어스가 인가되는 시간 동안에는 전자 온도가 국부적으로 큰 차이를 보이게 되는데 이 때 맥스웰 분포에서 벗어나는 정도가 커질 것으로 예상된다. 이 부분을 정확히 해석하기 위해서는 볼츠만 방정식을 매 시간 스텝마다 풀어서 그 결과를 가지고 전자의 확산 속도, 이동도, 전자 화학 반응 속도를 계산하여야 한다. 그러나 이런 운동학적 해석은 아주 간단한 2차원 문제를 제외하고는 거의 현실적인 시간 내에 해석 결과를 내기 어려워서 look-up table 등의 방식으로 간략화하지만 이 경우에는 화학종들의 농도가 크게 바뀔 때 정확성이 많이 떨어진다. 본 연구에서는 맥스웰 분포를 가정하였다. ICP의 경우 안테나와 근접한 부위에서 맥스웰 분포에서 벗어나는 고에너지 전자의 분율이 중요하다는 보고들이 있었으나 Ar 방전에 대해서는 그 중요도가 상대적으로 낮다고 판단된다. 이온화, 해리 반응의 문턱 에너지가 복잡하게 구성되는 분자 가스(예: SiH₄)

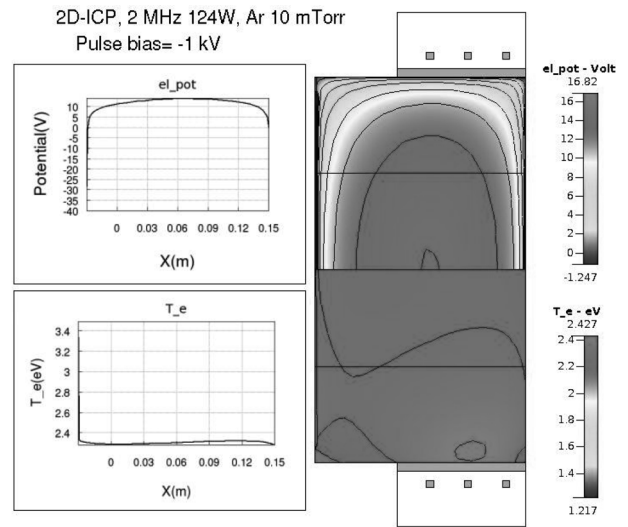


Fig. 3. Electric potential and electron temperature profile when the negative bias pulse is begun to develop.

의 경우에는 전자들의 에너지 분포가 맥스웰 가정에서 벗어나는 것이 전체적인 계산 결과에 미칠 수 있는 영향을 간과할 수 없을 것이다.

그림 3에 펄스 전압 인가가 시작된 후의 전자 밀도와 온도의 분포를 나타내었다. 기판 주변의 전자 온도가 3.3 eV까지 증가하였고 쉬스의 발달이 보이고 있다. 기판 주변의 전위도 -40 V까지 하강하였다. 이 때 형성되는 쉬스(sheath)와 프리쉬스(pre-sheath)는 고전적인 Child-Langmuir sheath가 아니고 음의 전압에 의해서 전자들이 먼저 밀려나고 이온들만 존재하는 이온 매트릭스 쉬스(ion matrix sheath)가 된다. 실제 공정에서 많은 관심을 가지고 있는 부분은 이 이온 매트릭스 쉬스에서 기판에 입사하는 이온의 에너지 분포와 입사각 분포인데 Koo 등의 실험 결과에 따르면⁵⁾ 플라즈마 전위가 8-14 V로 측정되었다고 보고하고 있다. 본 연구에서 전산 모사한 결과와 유사한 수치이다. 이 값은 에너지 분석 가능 질량 분석기를 이용해서 펄스 인가 전극의 대면 전극에서 측정된 Ar 이온의 에너지에서도 10-20 eV로 나타나고 있으므로 잘 맞는 범위에 속한다고 할 수 있다. 그 이유는 유도 결합 플라즈마의 특성상 낮은 임피던스로 펄스 바이어스를 인가하더라도 영향이 미치는 범위가 쉬스 두께 정도이므로 대면 전극에서 측정된 결과는 쉬스의 거동을 제대로 반영하고 있다고 할 수 없기 때문이다. 정확한 쉬스의 거동, 즉 시간에 따른 전기장의 분포를 측정하려면 레이저 유도 형광법을 사용하는 것이 더 적합할 것으로 판단된다.

그림 4에는 -1 kV의 전압이 온전히 기판에 인가

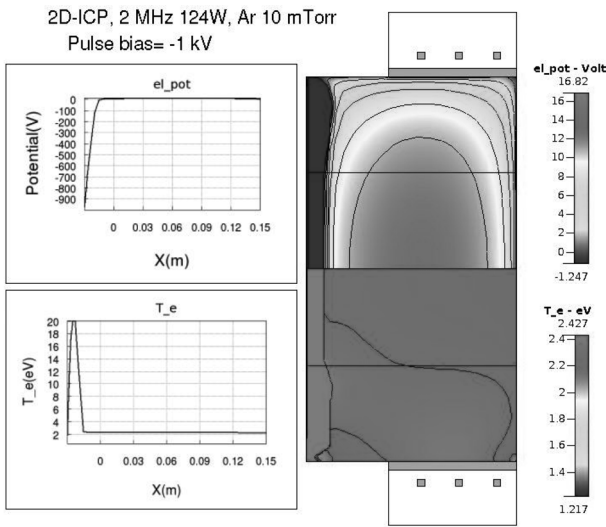


Fig. 4. Electric potential and electron temperature profile when the negative bias pulse is fully developed to -1 kV.

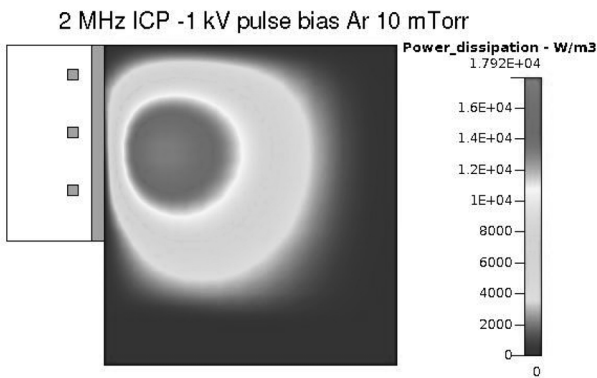


Fig. 5. The inductive power absorption profile of the standard configuration.

되었을 때의 전산 모사 결과를 나타내고 있다. 전자 온도가 20 eV까지 상승한 것으로 나타나고 있는데 이는 맥스웰 분포를 가정했기 때문에 나타나는 결과라고 할 수 있다. 정확한 전자 에너지 분포 함수를 고려한 모델을 추후 계획하고 있다. 이 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 기판의 반경 방향으로 쉬스의 두께 불균일이 이온 도핑이나 이온 질화에 영향을 줄 수 있다. 따라서 기판의 중심에서 50 mm, 100 mm에서 입사하는 이온의 밀도를 계산하여 비교하면 각각 최고 200, 30 A/m²으로 큰 차이가 있다. 이 차이는 플라즈마 밀도 즉, 전자 밀도가 벽면에서의 재결합 손실에 의해서 가운데의 밀도가 현저히 높은 구조로 되어 있기 때문으로 판단된다.

그림 5에는 유도 결합 흡수 전력 밀도를 나타내었는데 전력 흡수는 다음과 같은 식에 의해서 주어진다.

$$P = P_{Joule} + P_{ind} + P_{ext} \quad (2)$$

$$P_{Joule} = \vec{j}_e \cdot \vec{E} = e\vec{\Gamma}_e \cdot \nabla\phi \quad (3)$$

$$P_{ind} = \frac{1}{2}Re(\vec{j}_e \cdot \vec{E}) = \frac{1}{2}Re(\tilde{\sigma})\omega^2|\tilde{A}|^2 \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{\epsilon_0\omega_{ep}}{\nu_m + i\omega} \quad (5)$$

$\tilde{\sigma}$: electrical conductivity

ϵ_0 : permittivity of free space

ν_m : electron collision frequency

ω_{ep} : electron plasma frequency

ω : angular frequency of the induction power source

즉, 이온과 전자들이 많이 모여 있는 곳의 전기 전도도가 증가하게 되고 이곳의 전력 흡수도 따라서 증가하므로 유도 결합 플라즈마의 경우 플라즈마 밀도 균일도를 넓은 공간에서 확보하기가 쉽지 않다. 이온 밀도에 영향을 미치는 요인의 하나가 표면 재결합인데 본 연구에서와 같은 10 mTorr 정도의 낮은 압력에서는 삼체 충돌에 의한 공간 재결합은 그 확률이 매우 낮기 때문이다. 본 연구에서는 Ar 이온의 표면 재결합 확률을 1.0으로 가정하였는데 많은 반도체 장비들이 내벽을 산화물로 보호 처리 하고 있는 점을 감안 하면 훨씬 낮은 재결합 상수를 적용하는 것이 더 현실적이라고 생각된다.

그림 6에 보인 플라즈마 공간 내의 전자 온도와 전위의 시간에 따른 변화를 보면 기판의 펄스 바이어스에 의한 공간 전위의 변화는 5 V 정도 밖에 되지 않는 것을 알 수 있으며(Debye 차폐 효과) 전자 온도는 미세하지만 음의 펄스 전위 형성 시간에 증가하는 것을 알 수 있다. 펄스 바이어스 효과가 가

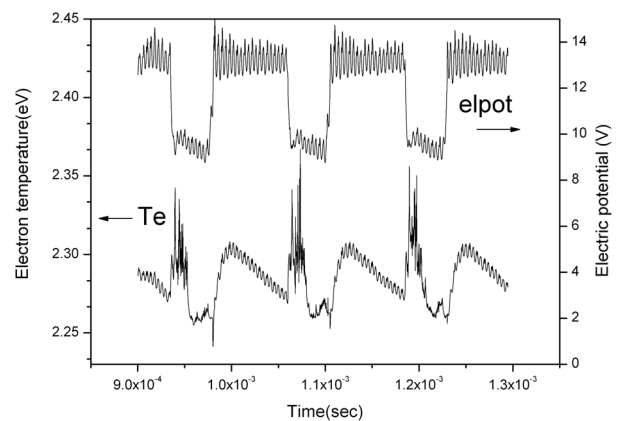


Fig. 6. Electric potential and electron temperature as a function of pulsing time.

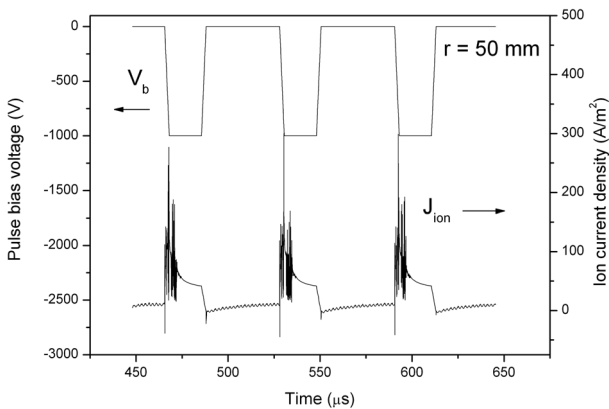


Fig. 7. Pulse bias and correspondent ion current density calculated at radial position 50 mm from the center of the wafer.

장 크게 나타나는 것은 바이어스를 인가하는 기관의 이온 전류일 것이다. 그림 7에 보인 바와 같이 높은 이온 전류 밀도를 갖는 시간 영역이 음의 바이어스 영역과 동조하여 존재하게 되는데 이 때 이온 주입이나 질화 반응 등에 영향을 주는 양이온의 입사가 일어나게 된다.

추후의 연구에서는 기관에 입사하는 이온의 에너지와 각도 분포를 구하는 입자 시뮬레이션을 진행할 예정이다. 쉬스 경계면에서 이온을 Bohm 속도로 출발 시키고 쉬스 내에서는 동종의 중성 입자와 가장 빈번하고 중요한 반응인 전하 교환 충돌 단면적을 이용하여 최종적인 에너지 분포와 각도 분포를 구하고 이를 자료로 활용하여 고체 내에서의 궤적을 구하는 프로그램을 이용하면 최종적인 이온 도핑 분포를 구할 수 있다. 이온 질화의 경우에는 주입 되는 깊이는 상당히 얇은 반면 확산에 의한 질화층 생성이 중요한 메커니즘이므로 단순히 이온 에너지 분포와 각도 분포만으로 공정의 특성을 결정지을 수는 없을 것이다.

현재 계산 모델에서 사용한 4회 이상의 안테나에 대해서 예측한다면 안테나의 인덕턴스 증가로 고전압 공급부에서 가까운 부위의 전위 변동이 유전체 창을 지나서 플라즈마의 국부적인 전위에 영향을 미치게 되는데 안테나 감은 수가 늘어나게 되면 고주파 정전 포텐셜이 영향을 미치는 면적이 늘어나

서 CCP의 효과를 더 많이 나타내게 될 것으로 생각된다.

4. 결 론

유체 모델식을 사용하여 축대칭 2차원 유도 결합 플라즈마 장치의 펄스 바이어스 효과를 수치 전산 모사를 수행하였다. Ar 10 mTorr에 대해서 -1 kV의 펄스를 수 kHz로 인가한 조건을 계산한 결과 펄스 인가 이전의 상태에서는 전자 온도 2 eV, 전자 밀도 10^{11} #/cm³, 플라즈마 전위 10 V 내외를 나타내었다. -1 kV의 펄스가 인가되었을 때 전위 기준으로 20 mm 정도의 쉬스가 발달하였다. 이 때 순간 전자 온도는 20 eV까지 상승하였다. 기관에서의 입사 이온 전류 밀도는 중앙부에서 최대 200 A/m²로 높았으나 반경 100 mm에서의 값은 1/10 정도로 균일도가 좋지 않았다. 유도 결합 플라즈마의 임피던스가 낮아서 기관의 펄스 바이어스는 챔버 전체의 플라즈마 특성의 평균값에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 계산되었다.

후 기

본 논문은 산업자원부가 지원하는 소재원천 기술 개발 사업을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

참고문헌

1. J. J. Lee, J. H. Joo, Surf. Coat. Technol., 169-170, (2003) 353.
2. J. H. Joo, J. Kor. Vac. Soc., 18 (2009) 164.
3. L. Godet, Z. Fang, S. Radovanov, S. Walther, E. Arevalo, F. Lallement, J. T. Scheuer, T. Miller, D. Lenoble, G. Cartry, C. Cardinaud, J. Vac. Sci. Technol. B, 24 (2006) 2391.
4. CFD-ACE+ User Manual, ESI Group, 2009.
5. B.-W. Koo, Ziwei Fang, Ludovic Godet, Svetlana B. Radovanov, Christophe Cardinaud, Gilles Cartry, Andre Grouillet, and Damien Lenoble, IEEE Trans Plasma Sci. 32 (2004) 456.