<연구논문>

한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 45, No. 4, 2012.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2012.45.4.174>

사각형 유도 결합 플라즈마 시스템의 수치 모델링

주정훈*

군산대학교 신소재공학과, 플라즈마 소재응용센터

Numerical Modeling of a Rectangular Type Inductively Coupled Plasma System

Junghoon Joo*

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

(Received August 26, 2012 ; revised August 29, 2012 ; accepted August 30, 2012)

Abstract

Low pressure inductively coupled plasma characteristics of argon and oxygen are numerically simulated for a 400 mm rectangular type system with a plasma fluid model. The results showed lower power absorption profile at the corner than a circular one in a 13.56 MHz driven 1.5 turn antenna system with a drift-diffusion and quasi-neutrality assumption. Ions controlled by electric field are more non-uniform than metastables and the power absorption profile of oxygen plasma is affected by horizontal gas flow pattern to show 25% lower power absorption at the pumping flange side. Oxygen negative ions which are generated in electron collisional dissociation of oxygen molecules was calculated as 0.1% of oxygen atoms with similar spatial profile.

Keywords: Inductively coupled plasma, Numerical modeling, Sputtering, Bipolar plate

1. 서 론

유도 결합 플라즈마를 이용한 공정 장비는 식각, 증착, 표면 처리 등으로 나눌 수 있는데 크게 원형의 웨이퍼를 처리하는 반도체 장비와 사각형 기판을 처리하는 디스플레이용 장비 그리고 임의의 3차원 물체를 처리하는 장비이다. 장비 개발에 필수적인 챔버 규격의 결정은 가스 유동 및 전자파의 균일 흡수능에 대한 계산을 기반으로 이루어진다. 기하 구조에 의한 영향을 해석하는 방법의 1차 근사로 전자파에 대한 계산은 플라즈마를 일정한 유전율을 갖는 평판으로 가정하고 전력 흡수 밀도를 유한 차분법이나 유한 요소법으로 풀어서 공간 균일도를 보는 방법이 주로 사용된다¹⁻³⁾. 가스 유동에 의한 영향은 주로 화학 반응이 지배적인 경우에 지

배적인 요소이며 반응에 참여하는 가스의 개별 성질(점도, 비열 등)을 정확히 입력해야 하고 열전달 방정식을 같이 풀어서 정확한 증착/식각 표면 반응을 구현하여야 해석할 수 있다. 본 연구의 수치 계산은 플라즈마 유체 모델을 이용하였고 화학 반응은 전자들이 맥스웰 분포를 한다고 가정하고 반응 속도식을 구해서 고려하였다. 유체 기반의 수치 모델은 전자-중성 간의 충돌이 충분한 압력 영역에 대해서 제안되었으며 본 연구에서 적용하는 압력 범위는 10 mTorr 이상이다. 코드는 상용 제품인 CFD-ACE+(ESI사)를 이용하였다. 3차원 모델을 해석하므로 상당한 연산 시간이 요구되며 현재 코드의 한계로 Poisson 방정식을 풀지 않고 준중성 조건만으로 전위를 계산하며 쉬스는 아날리틱 모델로 처리하였다. 이 경우 플라즈마 공간에서의 밀도, 온도 분포의 정확성에는 큰 문제가 없으나 벽면 근처에서의 분포는 차이가 날 수 있다.

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

유동에 많은 영향을 끼치는 기관과 챔버 벽면의 거리가 결정하는 배기 컨덕턴스는 공정 및 부산물 가스의 제거 속도를 결정하며 이에 따라서 공정 속도(식각/증착/표면처리)의 제어에 있어서 핵심적인 부분이다. 점성 유동 영역이나 분자 유동 영역에서의 컨덕턴스는 이론적, 실험적으로 잘 정비되어 있으나 전이 영역에서는 두 영역의 한계에 해당하므로 정확하지 않은 단점이 있다. 유동의 특성을 결정하는 무차원 수인 누센수(Knudsen's number)는 평균 자유 행로와 그 진공 시스템의 특징적인 기하적 크기의 비로 정해지며 다음과 같다⁴⁾.

$$Kn = \bar{l}/d \quad (1)$$

Kn : Knudsen's number

$\bar{l}$: mean free path

d : characteristic length of the vacuum system

이 값이 0.01이하이면 점성 유동, 1이상이면 분자 유동으로 볼 수 있다.

본 연구에서 주로 계산한 10 mTorr를 예로 들어 보면 공기 기준의 평균 자유 행로가 0.5 cm이므로 분자 유동 영역은 0.5 cm의 기하적 특성 거리가 나온다. 즉, 0.5 cm 이하의 간격인 곳에서는 분자 유동의 특성을 나타낸다고 할 수 있다는 것이다. 이는 주로 가스 인입구의 설계에 반영된다. 점성 유동 영역에 대해서는 0.01이 기준값이므로 50 cm가 된다. 이 값을 넘는 간격에서는 점성 유동으로 해석하면 된다. 기관의 크기가 40 cm 정도이므로 챔버의 크기를 50 cm 정도로 설정하면 10 mTorr의 압력에서 횡방향으로는 점성 유동 영역이라고 보아도 무방하다. 문제는 하방으로 이루어지는 배기인데 기관과 챔버 벽면 사이의 거리를 설정할 때 유동 영역의 특성이 전이 구역이 된다는 점이다.

또 한 가지 중요한 특성은 유동이 층류와 난류를 결정하는 레이놀드수이다(Reynold's number). 주로 반응성 가스 또는 희석 가스의 유량을 높여서 공정을 진행하는 경우에 잘 발생하며 다음과 같은 식으로 결정되는 무차원 수가 그 특성을 나타낸다.

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (2)$$

Re : Reynold number

ρ : 비중

η : 점도

v : 평균 유속

d : 관의 직경

이 값이 2000 이상이면 난류 이하이면 층류로 구분한다. 즉, 일정한 직경의 관에서 점성이 매우 낮아 지거나 유속이 빨라지면 난류의 거동을 보이게 된다는 것이다. 사각형 반응기의 경우 펌프와 연결되는 배관을 형성하는 방법에 따라서 이 조건이 차이나게 되는데 10 mTorr의 압력에서 1 slm(standard liter per minute)의 유량을 목표로 하면 $1 * 760 / 0.01 = 76000 \text{ liter/min} = 1266 \text{ liter/sec}$ 의 배기 속도가 필요하다. 쓰루풋(throughput)으로 단위를 환산해 보면 $1 \text{ slm} = 1013/60 \text{ mbar liter/sec} = 16.8$ 이 된다. 이 때 배기 통로의 면적이 작으면 유동의 특성은 난류로 변하게 된다. 특히 기관의 중앙부에서는 수직으로 입사된 반응성 가스의 유동 방향이 변하는 과정에 있으므로 속도가 느리지만 가장 자리로 갈수록 유속이 빨라져서 반응 속도에 영향을 줄 수 있다. 원형의 웨이퍼에 대한 반도체 장비의 경우 가장 자리에 유속 및 전기장 조절용 부품을(예: process single ring, guard ring) 설치하는 것도 이 때문이다. 본 계산에서는 일단 층류를 가정하여 연산을 수행하였다.

2. 계산 방법

계산에 사용된 기하적 구조는 직사각형 챔버이며 각각 600 mm×500 mm×200 mm로 했으며 챔버의 표면은 전도체로 가정하였다. 유도 결합 안테나가 있는 영역과 진공 부분은 유전체 창으로 격리되어 있다. 안테나에서 기관 표면까지의 거리는 70 mm이다. 이 거리는 안테나에 의한 불균일한 전력 흡수 패턴이 이온과 중성 입자의 확산에 의해서 완화되는데 필요한 값으로 산정한 것이다. 고전력 영역에서는 가스의 압력이 낮을 때 온도 상승에 의한 가스 입자의 열운동 속도 증가로 확산이 상온을 가정하고 계산했을 때보다 훨씬 활발해지는 경우가 있다. 따라서 최적의 안테나-기관 간 거리의 산정은 열전달 방정식 까지를 모두 고려한 상태에서 결정하는 것이 바람직하다. 가스 유동을 풀지 않고 전력 흡수 패턴만을 고려했을 때의 정확도가 80% 정도라면 실제 화학 반응(공간/표면), 열전달 방정식을 모두 고려했을 때에는 수 %이내로 감소한다.

격자는 직육면체로 작성하였고 사용한 방정식은 기존의 문헌에 나와 있다⁵⁾. 격자 구성은 직육면체 셀을 기본으로 하였으며 기하적 형상에 따라서 크기를 조절하였다. 총 셀의 개수는 약 백만 개이며, 사용 OS는 CentOS 5.3, CPU는 인텔 Xeon 5650 dual processor, 12 GB의 주메모리의 하드웨어에서 소요되는 시간은 27시간 정도였다.

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 알콘에 대한 유도 결합 플라즈마 수치 계산 결과

알콘은 가장 많이 사용되는 플라즈마 생성 가스이고 전자 충돌 이온화 단면적이 상대적으로 크고 준안정상태가 있어서 용이하게 방전 개시가 가능하기 때문에 장비 개발 초기에 검증용으로 많이 사용한다. 수치 모델은 기본적으로 입자 보존과 에너지 보존식을 반복법을 이용하여 해를 구하는 것이므로 화학 반응식의 수가 적은 것이 수렴에 유리하다. 가장 에너지 보존 방정식에 많은 영향을 주는 전자 충돌 이온화, 전자 충돌 내부 에너지 여기, 준중성 상태에 의한 2단 이온화 등을 고려하면 적은 수의 전자 화학 반응으로 공정을 모사할 수 있다. 전력 흡수의 계산을 위해서는 반드시 전자-중성간의 탄성 충돌 빈도수를 구해야 하는데 전자 에너지에 대한 함수로 충돌 단면적을 넣는 방법과 고전적인 강구 충돌로 가정하고 가스 압력에 대한 함수로 구하는 방법이 있다. 물리적 의미로는 전자를 사용하여야 하지만 반복법의 특성상 초기 계산 스텝에서는 부정확한 전자 온도 예측에 따른 값이 급속도로 오차를 누적시키는 일이 있으므로 공간격자를 구성할 때 매우 주의를 하거나 1차적으로는 전자 온도에 대해서는 상수로 처리하여 플라즈마 계산을 하고 2차 계산 때 전자 온도의 함수로 계산의 정확성을 개선해가는 작업이 필요한 부분이 있다. 주로 이중, 삼중으로 벽면이 만나는 모서리 부분에서 이와 같은 일이 자주 발생할 확률이 높다. 이는 특히 전자 온도의 작은 차이에 대해서 전자-중성 충돌 단면적에 큰 변화를 보이는 1 eV 이하 영역에서 자주 발생한다. 그림 1에 나타난 것은 전자 밀도 분포이며

1.5회전 안테나의 특성상 동일한 방향의 안테나 전류가 겹치는 영역의 전계 강도가 높으므로 높은 전자 밀도를 보이고 있다. 원형 안테나와 달리 사각형이므로 모서리 부분의 밀도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 피크 값으로 비교하면 6:1 정도로 충분한 확산 거리를 확보하여야 기관 위치에서 10% 이내로 균일한 공정 결과를 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

그림 2의 전자 온도는 2.1 eV~2.4 eV 사이의 값을 보이고 있다. 큰 차이는 아니지만 화학 반응 속도식에서는 지수에 포함되어 있으며 전술한 바와 같이 낮은 전자 온도에서도 활발한 탄성 충돌과 이단계 이온화 과정 때문에 정확도가 요구된다. 벽면에서의 경계 조건은 상수, 기울기 상수, 열 플럭스 균형의 세 가지가 제공되고 있다. 이 중 상수는 정확히 경계에서의 전자 온도를 선험적으로 알 수 없고 실험적으로도 벽면 근처에서 정확한 측정이 어렵기 때문에 실질적으로는 사용하기 곤란한 조건이다. 열 플럭스 균형 조건은 전자들이 에너지를 갖고 벽면으로 손실되는 것을 고려한 것으로 실제의 경우와 가장 근사하다. 실제적으로는 벽면 주변의 셀의 전자 온도를 이용하여 벽면에서의 전자 온도를 계산한다⁶⁾. 챔버의 높이가 높을수록 전자 온도는 감소하는 경향이 있다는 보고가 있다²⁾. 이 보고에 따르면 챔버의 높이가 증가할 때 전자 온도는 단조 감소하는 경향을 보이거나 전자 밀도는 특정 높이에서 최대값을 보인다는 것이다. 그 원인에 대해서는 전자의 평균 자유 비행 거리가 챔버의 특성 크기(여기서는 기관에서 유전체 창까지의 거리)보다 충분히 길기 때문에 기하적 원인에 의한 되튀김(bounce) 효과가 나타나기 때문이라고 한다. 두 가지의 되튀김이 제안되었는데 하나는 챔버 높이가

3D-ICP type A 13 MHz 528 W Ar 20 mTorr

Fig. 1. Electron density distribution of a rectangular type inductively coupled plasma system (13.56 MHz, 528 W Ar 20 mTorr).

3D-ICP type A 13 MHz 528 W Ar 20 mTorr

Fig. 2. Electron temperature distribution of a rectangular type inductively coupled plasma system (13.56 MHz, 528 W Ar 20 mTorr).

경계 조건이 되는 경우이고 다른 하나는 전자파의 흡수 깊이인 표피 깊이(skin depth)가 경계가 되는 경우이다. 이들의 실험 결과에서는 챔버 높이를 20 cm로 했을 때 전자 온도가 3.8 eV, 6 cm로 낮추었을 때 4.5 eV로 변화했다고 한다. 식각이나 증착용 가스의 경우 전자 온도에 따라서 매우 민감한 해리 과정을 보이는 종이 있다. 이 때 유용한 물리적 변화의 하나다. 대개 물리적 현상을 이용하는 공정에서는 이온 플럭스의 균일도가 매우 중요한데 기판에서 각 방향으로 입사하는 모든 이온의 플럭스를 제공된 평균을 하면 그림 3과 같다. 최대/최소값을 보면 0.3에서 0.05로 매우 큰 차이가 나고 있으며 바이어스 전력의 인가 없이는 균일한 물리적 공정(식각, 스퍼터링 효과 위주의 표면 처리)이 어렵다는 것을 알 수 있다. 가장 낮은 이온 플럭스를 보이는 곳은 가장자리 영역이며 이는 안테나의 형상과 깊은 관련이 있다. 본 모델에서 적용한 안테나의 모서리에는 유도 전류가 매우 적은 그림자 영역이 존재한다. 이는 앞으로 안테나의 형상에 대한 개선 작업을 통하여 해결해야 할 문제이다. 대면적의 경우 안테나의 길이를 증가시키면 인덕턴스

(inductance)가 늘어나서 안테나에 유기되는 자기 바이어스 전압의 증가를 가져오고 이는 유전체 창 내면 스퍼터링에 의한 소모와 함께 기판 및 챔버 벽면에 미치는 쉬스 전위의 증가를 유발하여 유도 결합 플라즈마의 고유한 장점인 낮은 플라즈마 전위를 손상시키게 된다.

그림 4를 보면 알곤 이온의 밀도가 안테나의 외곽면 하부 지역에 집중되어 있음을 알 수 있는데 가장 자리의 낮은 이온 밀도 영역과 비교하면 4배 정도의 차이이다. 알곤 이온의 발생 경로는 전자-중성 직접 충돌 이온화와 준중성에 의한 2단 이온화로 나눌 수 있고 이온의 퍼짐은 전기장에 의한 드리프트와 열확산에 의존한다. 준중성 조건을 생각해 보면 전자들이 많이 발생하는 지역의 전위 포켓이 형성되면 양이온 역시 그 지역에 많이 머물게 되리라고 예상할 수 있다. 기판을 얇은 금속막으로 사용하는 경우에는 지지대를 사용해야 하는데 기하적 구조 및 전도성 여부가 주변의 플라즈마 밀도 분포에 큰 영향을 주게 된다. 하전 입자가 아닌 중성종들은 전위 분포와는 상관없이 주로 농도 경사에 따른 확산에 의해서 분포가 결정된다. 그 예로 그림 5의 알곤 준안정종의 농도 분포를 보면 최대, 최소는 6배 정도의 차이를 보이지만 챔버 중앙부위의 확산이 많이 이루어져서 전체적인 밀도 균일도는 알곤 이온에 비해서 많이 개선된 것을 알 수 있다. 이온의 경우에는 기판에 고주파 바이어스 전력을 인가하여 거의 수직한 방향의 전기장이 인가되면서 유도 결합 전력과 용량성 결합 전력이 더해지면 보다 더 균일한 이온 플럭스 분포를 얻을 수 있다는 보고가 있다⁷⁾.

기판과 유전체 창 중간 높이에서 계산된 알곤 이온과 준안정 상의 밀도 분포를 같은 스케일로 그려보면 그림 6과 같다. 준안정 상의 밀도가 이온에 비해서 높음을 알 수 있고 위에 서술한 바와 같이 이온보다 균일한 분포를 보이고 있다. 따라서 상대적으로 높은 에너지 상태를 가지고 있는 알곤 준안

Ion flux at the substrate Ar 20 mTorr (mA/cm²)

Fig. 3. Total ion flux at the substrate (50 mm below the dielectric window, same condition of Fig. 1).

3D-ICP type A 13 MHz 528 W Ar 20 mTorr

Fig. 4. Number density of Ar ion at a central vertical section (same condition of Fig. 1).

Fig. 5. Number density of Ar metastable at a central vertical section (same condition of Fig. 1).

Fig. 6. Comparison of Ar ion with Ar metastables at the central half height between the substrate and the dielectric window (same condition of Fig. 1).

Fig. 7. Power absorption profile at a central vertical section (same condition of Fig. 1).

정 상(11.94 eV)에 의한 해리 과정이 가능한 반응성 가스를 이용하는 공정에서는 높은 수준의 공간 균일도를 확보할 수 있는 좋은 자료가 된다.

안테나의 형상 최적화를 위한 노력은 대개 균일한 전력 흡수에 초점을 맞추고 있는데 그림 7에 보인 것과 같이 주로 모서리 부분의 낮은 값이 문제이며 이를 해결하기 위한 노력으로 안테나의 형상 변형(병렬식 안테나의 경우 간격 조절), 모서리 부분의 표면 재질 변화를 통한 재결합 손실의 감소 등이 가능하다.

3.2 산소에 대한 계산 결과

산소는 이원자 분자로써 알곤에 비해 상대적으로 복잡한 전자 충돌 화학 반응 경로를 갖고 있다. 따라서 알곤과 같은 비활성 기체와는 달리 유동 현상을 정확히 해석하는 것이 중요하다. 그림 8에 나타난 것은 동일한 챔버 구조에서 좌측에 가스 주입구를 설치하고 우측 하단에 배기 포트를 연결한 것을 가정한 모델의 계산 결과이다. 실제 간단한 시스템의 경우 제작상의 용이성을 위하여 이와 같은 구조를 갖게 할 수 있다. 전술한 바와 같이 가스 유동

Fig. 8. Gas velocity profile at a central vertical section (13.56 MHz 821 W O₂ 10 mTorr).

3D-ICP 13 MHz 821 W O₂ 10 mTorr inlet=100 m/s 10 mm below window

Fig. 9. Power absorption profile at a central vertical section (same condition of Fig. 8)

3D-ICP 13 MHz 821 W O₂ 10 mTorr inlet=100 m/s

Fig. 10. Number density of oxygen negative ion at a central vertical section (same condition of Fig. 8).

의 특징인 표면 마찰력에 의한 것 때문에 배기구 쪽의 기판 가장 자리는 입구 쪽에 비해서 약 3배의 유속을 갖는 것으로 나타나 있다. 이 영향은 플라즈마 밀도의 공간 불균일도에 직접적인 영향을 준다. 그림 7의 알콘의 경우에 대한 전력 흡수 분포가 각 방향으로 대칭을 갖는 것에 비해서 산소에 대한 결과(그림 9)는 배기구 쪽의 전력 흡수 분포가 피크값 대비 25%정도 낮게 나타남을 알 수 있다. 즉, 가스 유동이 전력 흡수 패턴에도 상당한 영향을 미치고 있다는 것이다.

산소의 경우 음이온의 존재가 알콘과 다른 점 중의 하나다. 전위 구조에 대한 드리프트 양상도 반대로 나타나고 자기 바이어스 형성에 있어서도 가벼운 음전하 입자를 전자로 가정하고 무거운 양이온에 대한 것을 주로 고려하는 이론이 맞지 않는 환경이 형성된다. 원자 음이온의 발생 경로는 주로 전자에 의한 분자의 해리 과정($e + O_2 \rightarrow O + O^-$, $e + O_2 \rightarrow O^- + O^+ + e$)이 추가 된다. 그림 10에는 산

3D-ICP 13 MHz 821 W O₂ 10 mTorr inlet=100 m/s

Fig. 11. Number density of oxygen atoms at a central vertical section (same condition of Fig. 8).

소 원자 음이온의 밀도를 그림 11에는 산소 원자의 밀도 분포를 나타내었다. 이를 종합하여 보면 산소를 공정 가스로 하는 반도체 애싱(ashing)의 경우 가스 유동에 대한 고려를 전력 흡수와 함께 가장 중요한 인자로 고려하여야 함이 나타났다.

4. 결 론

유도 결합 플라즈마를 이용한 사각형 공정 시스템의 수치 모델을 통하여 안테나의 형상, 기판과 유전체 창과의 거리, 가스 유동, 공정 가스의 종류에 따른 플라즈마 특성을 조사 하였다. 1.5 turn 사각 안테나의 경우 모서리 부분의 전력 흡수 밀도가 낮은 단점이 있으며 알콘의 경우 하전 입자인 이온은 전력 흡수가 집중된 2~3번 turn 안테나 영역에서 피크를 보이고 전체적인 균일도가 좋지 않았으나 전기장의 영향을 직접 받지 않는 준안정상의 경우에는 드리프트의 영향을 받지 않아 훨씬 개선된 분포를 보였다. 공정 가스로 산소를 가정 하였을 때의 계산 결과에는 산소 분자가 전자와 해리 충돌하여 발생하는 원자 음이온의 농도가 산소 원자의 0.1% 정도로 나타났다. 비활성 기체인 알콘과 달리 산소의 경우 유동의 영향을 많이 받아서 전력 흡수 밀도도 배기구 쪽이 가스 인입구 쪽보다 25% 정도 낮게 나타났다. 전기적으로 중성인 활성종들이 참여 하는 공정에서는 전력 흡수 밀도에 더해서 가스 유동이 중요한 인자임을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 지식경제부가 지원하는 국가 반도체 연구개발사업인 “나노반도체장비원천기술상용화사업”을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

참고문헌

1. S. W. Lee, J. Kor. Vac. Soc., 18 (2009) 176.
2. C. W. Chung, S. H. Kim, S. H. Seo, H. Y. Chang, N. S. Yoon, J. Appl. Phys., 88 (2000) 1181.
3. D. C. Kwon, N. S. Yoon, J. Kor. Vac. Soc., 18 (2009) 151.
4. K. Jousten, Handbook of Vacuum Technology, Wiley-VCH (2008) 81.
5. J. H. Joo, J. Kor. Vac. Soc., 18 (2009) 164.
6. CFD-ACE+ V2011.0 modules manual vol II, p195.
7. H. C. Lee, C. W. Chung, J. Kor. Vac. Soc., 21 (2012) 121.