2D-ICP(inductively coupled plasma)에서 정전 탐침 삽입 시의 플라즈마 수치 계산

주정훈*

군산대학교 공과대학 신소재공학과, 플라즈마 소재 응용 센터

Numerical Modeling of Perturbation Effects of Electrostatic Probe into 2D ICP(inductively coupled plasma)

Junghoon Joo*

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

(Received February 21, 2011 ; revised February 27, 2011 ; accepted February 27, 2011)

Abstract

Numerical modeling is used to investigate the perturbation of a single Langmuir probe (0.2 mm diameter shielded with 6 mm insulator) inserted along the center axis of a cylindrical inductively coupled plasma chamber filled with Ar at 10 mTorr and driven by 13 MHz. The probe was driven by a sine wave. When the probe tip is close to a substrate by 24.5 mm, the probe characteristics was unperturbed. At 10 mm above the substrate, the time averaged electric potential distribution around the tip was severely distorted making a normal probe analysis impossible.

Keywords: Electrostatic probe, Inductively coupled plasma, Numerical modeling, Plasma, Computational fluid dynamics

1. 서 론

정전 탐침은 가장 보편적으로 사용되는 전기적인 플라즈마 진단 방법이다. 금속 팁에 (-)에서 (+)의 전압을 인가하여 그에 따른 전류값을 이용하여 플라즈마 내의 전자 온도와 밀도를 예측하는 장치로써 현재로써는 가장 신뢰성이 높고 간편한 진단 방법이다. 그러나 반응성 가스에 대해서는 금속 팁이 식각 또는 절연층 증착에 의한 어려움이 있고 반응기의 내부가 절연체로 되어 있을 때에는 단일 탐침에 의한 측정이 불가능하며 플라즈마 내로 직경 6 mm 내외의 세라믹 관과 금속 탐침을 삽입하여 전압을 인가하게 되므로 플라즈마에 대한 교란 영향이 의심되는 점이 단점으로 꼽히고 있다. 본 논문에서는 정전 탐침의 삽입이 가져오는 유동 및 플라즈마 특성의 교란 효과를 전산 유체 역학 수치 모델을 통하여 살펴보았다. 여기에 사용된 전자 온도 방정식, 이온 운동량 전달 방정식, 기본적인 유동 특성을 나타내는 Navier-Stokes 방정식 등은 문헌에 상세히 언급되어 있다¹⁾. 플라즈마를 유체 방정식으로 모델링하는 것에 대한 정확성은 많은 논란이 있을 수 있지만 저자들이 그 동안 식각 장치의 특성에 대한 수치 계산을 수 년 간 수행해온 경험으로는 현장에서의 식각 속도의 2차원적 분포, 웨이퍼 상부 일정 높이에서 반지름 방향으로의 Langmuir probe를 이용한 포화 전류 밀도의 분포 등이 잘 맞는 것으로 나타났으며^{2,3)}, 본 연구와 유사한 평판형 프로브를 경계의 일부로 계산한 수치 모델의 결과가 보고되었다⁴⁾. 단일 탐침의 경우에는 전압-전류 특성 곡선에서 2계 미분을 통하여 전자

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

에너지 분포 함수를 구할 수도 있지만 오차 범위가 큰 것으로 알려져 있다. 대개의 응용 예에서는 맥스웰 분포를 가정하고 전자 온도를 구하는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 맥스웰 분포를 가정하고 전개하였으므로 전압 - 전류 곡선에서 전자 에너지 분포 함수를 구할 수는 없다. 동일한 소프트웨어를 이용하여 볼츠만 방정식을 풀어서 전자 에너지 분포를 구한 보고도 있으나 연산 시간이 비현실적으로 길어서 일반적인 수치 모델에 적용하기는 어렵다⁵⁾. 정전 탐침이 열플라즈마에서 열 및 유동에 미치는 영향은 Lee 등이 발표한 바 있다⁶⁾. 그러나 이 보고는 열평형 플라즈마에 대한 계산 결과이어서 보다 저압의 비평형 플라즈마 상태인 반도체 및 디스플레이등의 공정용 플라즈마와는 입자들의 온도와 밀도 면에서 차이가 크다. 본 연구에서는 주로 1 Pa에서 100 Pa에 이르는 영역에서 플라즈마의 거동이 정전 탐침의 삽입에 의해서 어떻게 영향을 받는지와 탐침의 삽입 위치에 따른 교란의 차이 및 측정 결과가 유체 모델에 의해서 적절하게 구현되는지 살펴보고자 하였다. 특히 탐침이 기관에 근접하는 경우 기관 바이어스에 의한 쉬스의 팽창으로 탐침 영역이 플라즈마 벌크에서 쉬스로 변화하는 현상을 재현하고 최대한 기관에 근접 측정이 가능한 탐침의 위치 및 측정용 전압 인가 주파수와 전압, 기관 바이어스 전압과의 위상 관계에 대해서 고찰하고자 하였다.

2. 계산 방법

이전의 논문에서 유체 모델을 이용한 수식화 과정에 대해서 상세히 기술 하였으므로 생략한다^{7,8)}. 수치 계산에는 ESI사의 CFD-ACE+를 사용하였다. 격자 생성에 많은 노력이 소요되었는데 직경 0.2 mm의 탐침 끝 부위를 묘사하기 위해서는 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) number를 계산 조건에 따라 격자 간격과 시간 스텝의 크기를 적절히 조절하는 것이 수치해의 수렴성 확보에 있어서 중요하다. 시간 스텝의 크기는 플라즈마의 유전체 특성 시간(dielectric relaxation time)에 의해서 정해지나 여기서는 전자 플럭스에 대한 지수 함수적 공간 이산화(Sharfetter-Gummel exponential scheme) 방법을 이용하여 포아슨 방정식과 전자 밀도 방정식을 semi-implicit 방법으로 연결하여 훨씬 큰 시간 스텝을 적용할 수 있도록 하였다. 대개의 경우 큰 무리 없이 수렴되는 조건은 공통 시간 스텝은 10^{-6} 초, CCP 쪽은 10^{-9} 초 정도가 필요하였으나 탐침이 기관에 근접하는

등의 변화가 심한 경우에는 이보다 훨씬 작은 시간 스텝이 요구되었다.

$$\text{CFL number} = \frac{U_x^e \cdot dt}{\Delta x} + \frac{U_y^e \cdot dt}{\Delta y} \quad (1)$$

U_x^e, U_y^e : electron velocity in x or y-direction

dt : time step

$\Delta x, \Delta y$: grid size in x or y-direction

Poisson 방정식을 매 시간 스텝마다 푸는데 많은 계산 시간이 소요되므로 격자수를 물리적 현상을 구현하는데 필요한 최소한으로 해야 할 필요가 있다. 한 가지 조건의 모델에 대한 수렴된 수치해를 얻는 데, 대략 24시간 이상 소요되었다. 계산 영역 내에 불규칙한 형상의 구조물이 삽입되면 그에 맞는 격자 수정이 필요하다. 몇 번의 시행착오를 거쳐서 셀 개수를 6천 개 이내로 줄여서 가장 시간이 많이 걸리는 전자 에너지 분포 함수를 이용한 계산도 시도할 수 있도록 하였다. 실제 단일 탐침에서는 전자 에너지 분포 함수를 측정할 수 있다는 점이 가장 큰 장점으로 부각되는데, 수치 모델에서 Fokker Planck 식을 이용하여 볼츠만 방정식을 풀게 되면 압력이 낮은 경우 전자의 이동도, 확산 계수, 전자 화학 반응 상수 등을 충분한 충돌로 인한 평균화된 맥스웰 분포로 가정하는 것보다 정확하게 계산할 수 있게 된다. Kovalgin 등은 실험적으로 측정한 EEDF의 결과를 이용해서 SiH_4 의 유도 결합 플라즈마 내에서의 거동을 0-D global 모델을 이용하여 보고한 바 있다⁹⁾. 이들의 결과에서는 유도 결합 플라즈마 안테나에서의 거리에 따른 EEDF의 차이를 단일 탐침으로 Ar의 경우에 대해서 측정하여 20 eV와 40 eV에서 MB(Maxwell Boltzmann) 분포와 많은 차이가 나는 고에너지 전자의 존재를 발견하였고 이들이 MB 조건을 가정하고 진행하는 수치 모델링의 결과가 실험 결과와 많은 차이를 가져 오게 하는 원인이라고 주장하고 있다. 실제 이 Ar에서의 실험 결과를 이용해서 계산한 SiH_4 의 해리 반응에 대한 속도 상수는 2.5배에서 5배 정도 차이가 났다. 그러나 문헌에 보고되는 화학 반응 속도 상수 데이터들이 흔히 order가 차이나는 일이 있는 것을 감안한다면 EEDF에 의한 오차는 그렇게 결정적이지는 않다고 할 수 있다. 또한 실질적으로 의미가 있는 2-D, 3-D 모델에서는 수송 계수에 대한 데이터의 신뢰성이 더 큰 문제를 야기하는 점을 고려한다면 이들의 지적은 추후 2-D, 3-D 계산에 의해서 검증을 거쳐야 할 것으로 판단된다¹⁰⁾.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 프로브 삽입시의 유동장 특성

직경 330 mm, 높이 180 mm인 실린더 모양의 3 turn 안테나 장착 유도 결합 반응기에서 중앙에 탐침이 있을 때의 유동장 계산 결과를 그림 1에 나타내었다. 상부에서 가스가 유입되고 웨이퍼의 측면 65 mm 폭의 배기구가 있는 일반적인 구조를 가지고 있으며 직경 6 mm의 프로브 본체의 길이는 10 mm이며 직경 200 mm의 웨이퍼와는 124.5 mm 떨어져 있다. 배기구의 면적은 회전 대칭이므로 541 cm^2 이 되며 분자 유동 영역이라면 약 $9,000 \text{ l/sec}$ 의 컨덕턴스를 갖게 된다. 대개 식각 공정의 경우 1-30 mTorr의 압력 범위에서 운용하는 경우가 많으므로 분자 유동 영역과 점성 유동 영역의 전이 지역이거나 점성 유동 영역이라고 할 수 있다. 최근 낮은 압력에서 공정을 유지하고자 하는 공정들이 개발되고 있는데 이런 경우에는 분자 유동 영역으로 계산을 하여도 큰 무리가 없을 것이다. 본 계산에서는 10 mTorr를 기본 압력으로 설정하고 진행하였다. 점성 유동 영역의 가정의 정확성을 담보할 수 있는 가장 낮은 압력 범위라고 생각된다. 수직 하방의 가스 유동 특성을 갖는 경우 필연적으로 웨이퍼 중앙부에서 수직-수평 유동 방향의 변화를 가져오게 되고 웨이퍼의 가장 자리에서 유속이 빨라지는 특징이 나타난다. 식각 반응의 경우 부산물의 빠른 제거가 식각 속도 향상 및 플라즈마에 의한 라디칼 성분 제어를 통한 웨이퍼 표면의 중합체 증착 제어에 필수적이라고 알려져 있다. 프로브의 삽입이 이와 같은 전체적인 공정 특성을 크게 해치지 않는다는 것이 그림 1의 계산 결과에 나타나 있다.

3.2 탐침 삽입 시의 전자 밀도, 전위 계산

그림 2에는 프로브 팁에 100 Hz, 100 V의 사인파 전위를 인가하고 계산한 플라즈마 공간내의 시간

Fig. 2. Electric potential profile with a Langmuir probe biased by a sine wave voltage (100 Hz, 100 V).

Fig. 3. Magnified view of the fig. 3 around the probe tip.

평균 전위 계산 결과를 나타내었다. 프로브의 직경은 0.2 mm이고 세라믹 튜브의 최대 외경도 6 mm이고 기판과의 거리가 충분히 떨어져서 기판 주변의 전기장을 크게 변화시키고 있지는 않은 것으로 판단된다. 이 상태에서 전위 분포를 보면 최고값은 챔버의 중앙 부위에서 나타나고 있고 31 V 정도이다. 프로브 팁 주위를 확대하여 관찰하면(그림 3) 이상적인 전도체로 가정한 팁 전위는 자기 직류 전위를 나타내고 있으며, 이는 그림 4(a)의 그래프를 보면 알 수 있다. 프로브 표면의 평균 전위가 -17 V 정도로 나타나고 있으며 쉬스와 프리 쉬스(presheath)를 포함한 길이가 약 20 mm로 계산되었다. 또한 프

Fig. 1. Flow field calculation results with a Langmuir probe at center.

Fig. 4. (a) Time averaged electric potential distribution across a probe tip (b) Time averaged electric potential distribution across a probe tip's insulator.

로브의 보호관 역할을 하는 세라믹(이상적인 절연체로 가정)이 있는 위치의 단면 그래프(그림 4(b))에서는 세라믹의 표면 전위는 11 V, 쉬스 전체의 두께는 약 40 mm로 계산되었다. 실제 실험에 사용되는 세라믹은 약간의 누설 전류가 있는 비이상적인 절연체이므로 현재의 계산 결과는 미세한 누설 전류가 발생하여 전위에 변화가 있을 수 있는 것을 고려하지 않은 값으로 실제 값과는 약간의 차이가 있을 것으로 판단된다. 쉬스의 두께는 전자 온도, 밀도, 전위 등과 복잡한 함수 관계를 가지고 있다. 입자 모델의 경우에는 비교적 정확하게 쉬스의 거동을 계산할 수 있으나 유체 모델의 경우 질량이 다른 이온 종들이 존재하는 경우 각각의 확산과 이동도와 전기장의 곱으로 주어지는 드리프트 속도를 정확히 계산해야 하는데 실제보다 과다 계산된다는 지적이 있고 이를 해결하기 위해서 이온의 움직임을 입자로 따로 계산해서 유체로 계산한 전자의 움직임과 합하여 결과를 내는 혼합 방법도 제안되어

2D-ICP 13 MHz 10 A, Ar 10 mTorr inlet 1E-7 kg/s

Vcoil=0V, bias=100V, probe 100 kHz 100 V, istep10000

Fig. 5. Time averaged Ar ion density distribution when a tip is close to a substrate.

있다. 본 연구에 사용한 모델에서는 이온의 운동량 방정식을 식 (2)와 같이 고려하여 계산하였다.

$$\frac{\partial n_i \vec{V}_i}{\partial t} + (\nabla \cdot n_i \vec{V}_i) \vec{V}_i = -\frac{1}{m_i} \nabla (k_B n_i T_i) + \frac{q_i e}{m_i} \vec{E} n_i - \nu_{im} n_i \vec{V}_i \quad (2)$$

n_i : i-th ion density

$\vec{V}_i$: i-th ion's velocity

m_i : i-th ion's mass

T_i : i-th ion's temperature

q_i : i-th ion's charge

$\vec{E}$: electric field

ν_{im} : ion-neutral collision frequency

3.3 탐침이 기판에 근접했을 때의 플라즈마 특성 계산 결과

탐침에 인가되는 전위에 의한 섭동의 영향이 미치는 거리가 결정되면 최대로 탐침 끝을 기판에 근접시킬 수 있는 거리가 중요한 변수가 되는데 이는 기판의 쉬스 영역 부근에서 기판 인가 전위와 탐침 인가 전위의 상호 작용으로 추가적인 이온화가 이루어지면 정확한 측정을 할 수 없게 된다. 그림 6에는 프로브 팁의 끝을 기판에서 24.5 mm까지 근접시켰을 때 계산한 시간 평균 전위 분포를 나타내었다. 이 거리까지는 프로브의 영향이 기판에 미치고 있지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 10 mm까지 근접하면 그림 7에 나타난 것과 같이 기판과 프로브 주변의 시간 평균 전위 분포가 서로 영향을 미치기 시작하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 8에 나타난 시간 평균 전자 온도의 분포를 보면 프로브 주변과 기판 바로 위의 값이 그렇게 큰 차이

2D-ICP 13 MHz 10 A, Ar 10 mTorr inlet 1E-7 kg/s
Vcoil=0V, bias=100V, probe 100 kHz 100 V, istep10000

Fig. 6. Time averaged electric potential distribution when a tip is 25.4 mm close to a substrate.

2D-ICP 13 MHz 10A Ar 10 mTorr inlet 1E-7 kg/s
Vcoil=200 V Vprobe=100kHz 100 V

Fig. 7. Time averaged electric potential distribution when a tip is 10 mm close to a substrate.

2D-ICP 13 MHz 10A Ar 10 mTorr inlet 1E-7 kg/s
Vcoil=200 V Vprobe=100kHz 100 V

Fig. 8. Time averaged electron temperature distribution when a tip is 10 mm close to a substrate.

를 보이지 않고 있으므로 실제 프로브의 동작 전압-전류 특성에서 전자 온도를 정할 수 있는 수준의 결과만 얻어진다면 10 mm까지의 근접 측정도 가능하다는 결론을 도출할 수 있다. 추후의 계속 연구에서는 가장 어려운 부분인 전자 에너지 분포를 Maxwellian 가정을 하지 않고 Boltzmann 방정식을 직접 풀어 본 모델과 같은 단일 탐침에서 전자 에너지 분포 함수 측정이 재현 되는지, 이 경우 탐침 삽입에 의한 오차는 얼마나 되는지에 대해서 평가할 예정이다. 이는 탐침에 인가되는 전압이 +100 V에서 -100 V까지라고 할 때 국소 전기장의 크기가 추가적인 이온화를 많이 야기할 만큼 높아지게 되면 탐침의 존재가 기존의 플라즈마 특성을 너무 많이 교란시키게 되어서 탐침으로서의 기능을 상실하게 되기 때문이다. E/N(전기장/입자 밀도) 값을 비교해보면 프로브 주변에서는 최고 10^6 을 갖는 반면 접지되어 있는 플라즈마 챔버 벽면 주변에서는 10^4 정도를 갖는다. 따라서 가는 금속 팁을 사용하는 단일 탐침 방법보다는 직경 1 mm 정도의 원판을 사용하는 평판형 탐침이 기판에 근접하여 플라즈마 성질을 측정하는 목적으로는 더 적합하다. 또한 전압 인가에 따른 쉬스의 팽창이 작으므로 포화 전류 밀도를 측정하는데 더 유리하다¹¹⁾.

4. 결 론

플라즈마 유체 모델을 이용하여 2차원 축대칭 유도 결합 플라즈마 시스템의 중앙에 단일 탐침이 삽입될 때의 플라즈마 성질의 변화를 유도 결합 코일 구동 주파수 13 MHz, Ar 10 mTorr의 공정 조건에 대해서 수치 계산하였다. 유동장 계산의 결과 탐침의 삽입에 의한 변화는 거의 없는 것으로 나타났고 탐침을 기판에 24.5 mm까지 근접시켰을 때에도 플라즈마 성질은 거의 영향을 받지 않았으나 10 mm까지 근접시켰을 때부터는 전자 온도에는 영향이 크지 않으나 시간 평균 전위는 상호 간섭이 발생하여 정확한 탐침 특성을 볼 수 없을 것으로 계산되었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 고가장비구축사업인 “고온플라즈마 응용연구센터 구축사업”을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

참고문헌

1. ESI Corporation, CFD-ACE+Module Manual Part

- 2, 2010.
2. 홍광기, 최지성, 양원균, 주정훈, 한국표면공학회 2010년도 추계학술대회, 인천 송도.
3. 지식경제부 SystemIC 2010 사업 결과 발표회, 2009. 2. 26, 용평 리조트.
4. K. Bera, S. Rauf, K. Collins, American Vacuum Society Symposium, 2010. PS2-TuA11, Albuquerque, NM, USA.
5. Vladimir Kolobov, Robert Arslanbekov, Micro. Eng., 69 (2003) 606.
6. 이종철, 김윤제, 한국진공학회지, 17(3) (2008) 189.
7. 주정훈, 한국진공학회지, 18(3) (2009) 164.
8. 주정훈, 한국표면공학회지, 43(3) (2010) 154.
9. A. Y. Kovalgin, A. Boogard, I. Brunets, J. Hollenman, J. Schmitz, Surf. Coat. Technol., 201 (2007) 8849.
10. M. W. Kiehlbauch, D. B. Graves, J. Appl. Phys., 91 (2002) 3539.
11. M. Dickson, J. Hopwood, J. Vac. Sci. Technol. A, 15 (1997) 2307.