

플라즈마 식각 공정 시 비 침투적 방법으로 이온에너지 분포 측정 연구

오세진, 정진욱
한양대학교 전기공학과

Noninvasive Monitoring of Ion Energy Distribution in Plasma Etching

Se-Jin Oh, Chin-Wook Chung
Hanyang University Electrical Engineering

Abstract - 본 연구에서는 플라즈마 식각 공정 시 식각률, 선택비, wafer 손상등과 중요한 관련이 있는 이온 에너지 분포(IED)를 측정하기 위해서 챔버 내에 직접적으로 분석기를 설치하지 않고 챔버 외부에서 비 침투적(noninvasive)인 방법을 사용하여 측정하였다. 이 방법은 신호선 중 한 곳에 측정 점을 잡기 위한 연결 장치만 필요하며 그곳에서의 전압 신호와 전류 신호를 오실로스코프에서 측정한 후 미리 얻어진 챔버 구조 모델링 계수 등을 통해 실제 바이어스 전극에 걸리는 전압 및 전극에서 플라즈마로 흐르는 전류를 유추한다. 전압 및 전류 측정값과 power balance와 particle balance를 적용하여 얻은 플라즈마 특성 상태 변수들을 사용하여 oscillating sheath model을 기반으로 한 분석 프로그램을 통해 실시간 이온에너지 분포 결과를 얻었다. 실제 공정 시 바이어스 주파수 변화, 바이어스 파워 변화, 소스 파워 변화 조건 등에 따른 이온 에너지 분포 측정 및 분석을 통해 비 침투적 측정방법 적용의 가능성과 장점을 확인하였다.

1. 서 론

플라즈마 식각 공정에 중요한 영향을 미치는 이온에너지 분포 변화의 측정시 기존 방법은 실제 챔버 내에 분석기를 삽입, 장착 해야 한다. 그리드 분석기인 경우 웨이퍼를 제거하고 분석기를 고정시키기 위한 척을 새로 제작하여 챔버에 장착한 후 이온 에너지 분포를 측정하기 때문에 기존 사용한 구조와 조금이라도 다른 챔버라면 호환성에 어려움이 있다. 그리고 공정이 진행되는 중에는 사용할 수가 없다. 그러나 비 침투적 측정 방법은 기존의 상용 분석기와는 달리 챔버 내에 분석기를 삽입하지 않고 챔버 외부에 간단한 장치만 설치하고 외부 컴퓨터 프로그램으로 분석하기 때문에 경제적으로 매우 저렴하며 분석기 호환성 문제가 해결될 수 있으며 실제 공정이 진행되는 중에도 간단히 사용할 수 있어 실시간 이온 에너지 변화 감지를 할 수 있다 [1-8]. 또한 직접적 삽입으로 인한 분석기의 스퍼터링 효과 및 플라즈마 오염에 대한 문제를 해결 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 비 침투적 이온에너지 분포 측정 기술

2.1.1 측정 원리 및 동작 방법

플라즈마 공정 전에 바이어스 전극 입력 신호선에 연결된 외부 신호 측정 연결 장치에서 외부 신호 인가를 통해 연결장치에서 얻어지는 전압, 전류 신호와 실제 바이

어스 전극에서 걸리는 전압, 전류 신호 비교 분석을 통해서 챔버 모델링 계수 및 전송 파라미터를 얻는다. 선행 파라미터 행렬식을 적용하기 위해서 병렬 공진 회로 장치의 콘덴서 값과 인덕터 값 조정을 통하여 바이어스 전극 구동 주파수에 대한 최대 임피던스 값을 맞춘다. 마지막으로 최종 얻어진 이 값들을 분석 프로그램에 업데이트 한다 [1-9]. 공정 진행 시 챔버 내부 구조와 입력 파워, 삽입 기체 유량을 파워 균형식과 입자 균형식에 사용하여 현재 챔버 내의 플라즈마 밀도 및 전자 온도, 플라즈마 전위값을 구한다 [10,11]. 구한 값들은 분석 프로그램에 업데이트 된다. 공정 진행 시 외부 신호 측정 연결 장치에서 얻어진 전압, 전류 신호를 통해서 바이어스 전극에 걸리는 전압, 전류 신호를 업데이트 된 분석 프로그램을 통해서 구해진다. 분석 프로그램에서 바이어스 전극의 전압과 플라즈마 전위 값과의 차이로 인한 웨이퍼 쉬스 강하 전압을 계산한 후 플라즈마 상태 변수 값, 쉬스 강하 전압을 사용하여 실시간 쉬스 구간 내 전압 분포, 전기장 분포, 이온 밀도 및 속도 값을 진동 쉬스 모델을 기반으로 하여 유체 방정식과 프와송 방정식을 사용하여 얻는다 [9]. 이러한 계산을 통해서 마지막으로 바이어스 전압주기 내의 이온 에너지 분포 결과를 얻는다. 이때 측정된 전류값의 역할은 모델에서 예측한 전류값과의 비교를 통해서 제대로 전극의 실제 전압신호를 얻었는지 판단해주는 역할을 하여 프로그램상의 피딩 파라미터로 작용한다.

2.1.2 비 침투식 플라즈마 상태 변수 측정

웨이퍼에 입사하는 이온은 바이어스 전극에 형성된 쉬스의 전위차에 의해서 에너지를 얻기 때문에 비 침투식 방식으로 이온에너지 분포를 구하는 데 가장 필수적인 요소는 플라즈마 전위 측정이다. 식(1)에서와 같이 쉬스 강하 전위는 플라즈마와 바이어스 전극의 전위 차이다.

$$E_{ion} \approx eV_{sheath} (V_{sheath} = V_{plasma} - V_{electrode}) \quad (1)$$

전자온도, 플라즈마 밀도등의 상태 변수값은 쉬스 모델 해석을 통해 이온에너지를 구할 때 필요한 요소이다.

정전 단일 탐침등과 같은 외부 측정 장치를 플라즈마에 삽입하여 플라즈마 전위 및 상태 변수를 측정할 수 있으나 실제 공정이 진행 시 완전한 비 침투식 방법이 아니기 때문에 적절치 않다. 이 문제점을 해결하기 위해서 발생 챔버 내부 구조, 삽입 기체 유량 정보를 사용하여 입자균형식에 적용하여 전자 온도를 구할 수 있다. 그리고 입자 균형식에서 얻은 정보에 플라즈마 입력 파워 정보를 추가하여 파워 균형식에 적용하면 플라즈마 밀도를 구할 수 있다 [10]. 최종적으로 전자 온도와 챔버 내부 구조 및 소스 발생 방식을 사용하여 플라즈마 전위를 얻는다 [11].

2.1.3 진동 쉬스 모델

바이어스 전극에 형성된 쉬스 해석시 사용한 쉬스 모델은 진동 쉬스 모델을 사용하였다[8]. 쉬스 내 전하 분포는 이온 밀도만 존재하며 전자 밀도는 없다고 가정한다. 바이어스 전극에 가하는 신호의 주파수 변화에 의해서 쉬스와 플라즈마의 경계면이 시간 경과에 따라서 진동하게 된다. 측정된 쉬스강하 전압을 사용하여 식(2)에서와 같이 포아송 방정식을 풀어 쉬스 영역의 이온 밀도를 얻는다.

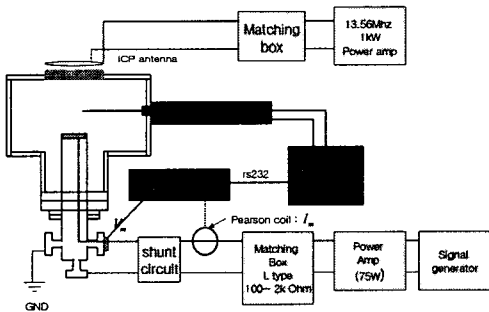
$$-\partial^2 V / \partial x^2 = \begin{cases} 0, & x < W(t) \\ en_i(x,t) / \epsilon_0, & x \geq W(t) \end{cases} \begin{matrix} (n_i(x,t): \text{이온 밀도}) \\ (W(t): \text{쉬스 경계면}) \end{matrix} \quad (2)$$

그리고 식 (3)에서와 같이 유체 방정식을 사용하여 쉬스 영역의 이온 속도를 얻는다.

$$\begin{aligned} \partial u_i / \partial t + u_i \partial u_i / \partial x &= eE / m_i \\ \partial (n_i u_i) / \partial x &= -\partial n_i / \partial t \\ \left(\begin{matrix} u_i: \text{이온 속도}, n_i: \text{이온 밀도}, \\ m_i: \text{이온 질량}, E: \text{전기장} \end{matrix} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

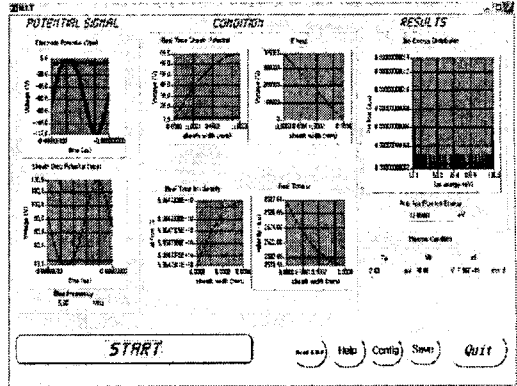
마지막으로 전극에서 유출한 이온밀도와 이온속도를 곱하여 이온 전류를 얻어 해당하는 쉬스 전위의 이온에너지 분포를 구한다.

2.2 실험 장치도 및 분석 프로그램



<그림 1. 실험 장치도>

그림 1은 실험 장치도이다. 플라즈마 소스는 유도 결합 플라즈마 (ICP)로 발생시켰으며 아르곤 가스를 사용하였다. 전원 공급 장치는 주파수가 13.56MHz 이며 최대 1 kW 까지 공급할 수 있으며 진공 가변 축전기 2개로 이루어진 alternative 형 매칭 박스에 연결되어 있다. 파워 균형식 및 입자 균형식으로 구한 플라즈마 상태 변수와 비교를 위해서 단일 정전 탐침(SLP 2000)을 사용하였다. 플라즈마 식각 공정 환경은 고주파 신호 발생기, 최대 75W 파워 증폭기 및 L-type 매칭 박스가 연결 되어 바이어스 판에 파워를 가하여 웨이퍼에 도달하는 이온에너지를 제어하였다. 실제 바이어스 판에 걸리는 전압과 전류 측정 보정을 위한 병렬 회로가 매칭 박스 다음에 연결하였다. 오실로스코프 및 피어슨 코일을 사용하여 외부 신호선 연결장치 한 점의 전압 및 전류를 측정하였다.

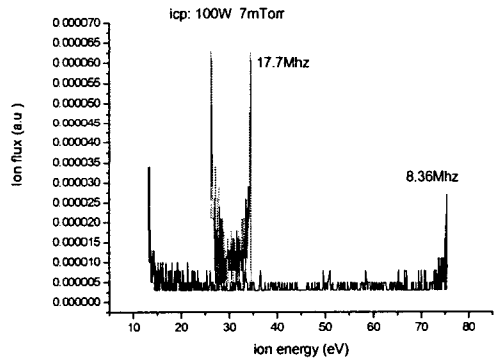


<그림 2. 이온에너지 측정 프로그램>

그림 2는 Labwindows/cvi 프로그램을 사용하여 만든 이온에너지 측정 프로그램이다. 오실로스코프에서 얻은 전압 및 전류 신호 및 실험 시 공정 환경 정보를 사용하여 실제 바이어스 전극에 걸리는 전압 신호 및 쉬스 강하 전위, 이온 밀도, 이온 속도, 전기장, 전자온도, 플라즈마 전위, 플라즈마 밀도를 구한 후 최종적으로 이온에너지 분포를 구한다.

2.3 결과 및 분석

2.3.1 바이어스 주파수에 따른 이온에너지 분포



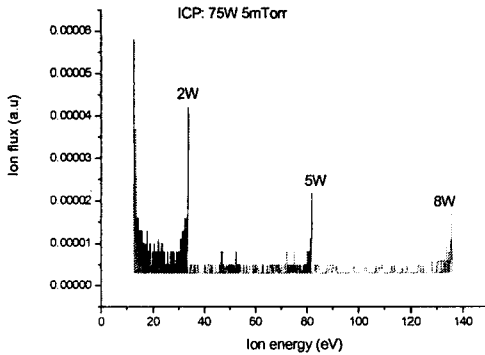
<그림 3. 바이어스 주파수 변화에 대한 IED>

그림 3은 바이어스 전극에 5W 파워를 고정시키고 주파수 변화에 따른 이온에너지 분포 변화 결과이다. 실제 실험상 바이어스 파워가 제대로 전극에 전달되었는지를 확인하기 위해서 단일 정전 탐침으로 바이어스 파워 유무에 따른 플라즈마 전위를 살펴 보았는데 파워가 전달 되었을 때 전위가 전달되지 않았을 때 전위파도 약 0.26V 증가하였다. 전극에 걸리는 전압 신호가 접지 대비 양의 부분일 때 플라즈마 전위가 증가하고 음의 영역일 때에는 거의 변화가 없는데 실제 실험에서 8MHz 정도의 주기로 인해서 실제 단일 정전 탐침에서 측정할 때 플라즈마 전위가 증가함을 보여준다. 실제로 플라즈마 전위가 크게 증가하지 않은 이유는 저지 축전기(4000pF)로 인한 음의 자기 바이어스(-30V)로 인해 최대 양 전위가 3V 정도이므로 플라즈마 전위가 크게 증가하지 않았다. 바이어스 주파수 변화 실험과 마찬가지로 바이어스 파워 변화, 소스 파워 변화, 압력 변화 실험에서도 마찬가지로 약간의 플라즈마 상승이 측정 되었다.

바이어스 주파수가 커지면 바이어스 전압(V)와 시간(t)에 따른 이온 전류는 Γ/V 이므로 바이어스 주파수가

증가하면 최소 에너지 피크와 최대 에너지 피크 사이의 에너지 차가 줄어들는데 실험에서 8.36Mhz에서 17.7Mhz로 증가함에 따라 에너지 차이가 급격히 감소함을 알 수 있다.

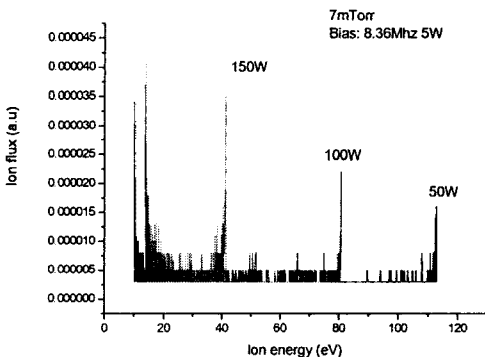
2.3.2 바이어스 파워에 따른 이온에너지 분포



<그림 4. 바이어스 파워 변화에 대한 IED>

그림 4는 바이어스 전극 주파수를 8.36Mhz로 고정시키고 바이어스 파워 변화에 따른 이온에너지 분포 변화 결과이다. 전극의 바이어스 파워가 커짐에 따라 고정된 파워 소스(ICP 75W)에서 전극으로 흐르는 전류는 일정하기 때문에 바이어스 파워를 증가시키면 바이어스 전극 전압이 커지게 된다. 그러므로 이온에너지 분포가 바이어스 전극 전압이 커지므로 쉬스 강하 전압이 크게 되어 높은 에너지 부분의 값이 커지게 되어 양 피크의 에너지 차이가 바이어스 파워가 증가함에 따라 늘어났다.

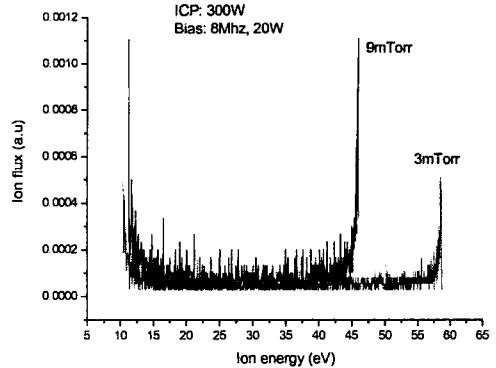
2.3.3 소스 파워에 따른 이온에너지 분포



<그림 5. 소스 파워 변화에 대한 IED>

그림 5는 ICP 소스 파워 변화에 따른 이온에너지 분포 결과이다. 소스 파워를 증가시키게 되면 플라즈마 밀도가 증가하고 전극에 들어오는 이온전류가 증가하게 된다. 그러나 바이어스 전극의 파워(5W)는 항상 일정하기 때문에 일정한 파워 대비 이온 전류의 증가는 바이어스 전극의 전압 감소로 이어진다. 그러므로 소스 파워가 증가함에 따라 바이어스 전압 감소가 되어 쉬스 강하 전위가 감소하게 되어 양 피크의 에너지 차이가 줄어들게 된다.

2.3.4 압력에 따른 이온에너지 분포



<그림 6. 압력 변화에 대한 IED>

그림 6은 압력 변화에 따른 이온에너지분포 변화 결과이다. 소스 파워 증가 현상과 마찬가지로 챔버 내 압력이 3mTorr에서 9mTorr로 증가하게 되면 플라즈마 밀도가 증가하게 되어 바이어스 전극의 전압이 감소한다. 그러므로 챔버내 압력이 증가함에 따라 쉬스 강하 전위가 감소하게 되어 양 피크의 에너지 차이가 줄어들게 된다.

3. 결 론

바이어스 주파수 변화, 바이어스 파워 변화, 소스 파워 변화 및 압력 변화에 따른 이온에너지 분포 결과가 예상과 맞게 측정되었다. 미세한 플라즈마 전위 변화를 바이어스 전극에 파워를 가하는 동안 정전 단일 탐침에서 측정된 값과 파워를 가하지 않고 측정된 결과 값의 확연한 변화 및 음의 자기바이어스의 바이어스 최대 전압 값과의 비교를 통해 바이어스의 파워 전달이 원활히 이루어졌다고 볼 수 있다. 시간에 따른 이온에너지 분포 변화 감지가 가장 큰 관심사이기 때문에 절대적인 이온 에너지 분포 값은 큰 의미가 없다. 바이어스 전극에 걸리는 전압 신호의 증가와 감소 및 파형 변화가 이온에너지 분포 변화에 영향을 주는 중요한 요인이므로 공정시 항상 일정한 이온 에너지 분포를 유지하기 위해선 일정한 전압 신호 제어의 필요성을 확인 할 수 있었다. 결론적으로 플라즈마 식각 공정시 이온에너지 분포 측정을 위한 비 침투식 방법의 사용 가능성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.A. Sobolewski, J.Vac.Sci.Technol.A,10,6,1992
- [2] M.A. Sobolewski, IEEE T.P.S,23,6,1995
- [3] M.A. Sobolewski, Physical Review E, 59,1,1999
- [4] M.A. Sobolewski, Applied Physics Letters,72,10,1998
- [5] M.A. Sobolewski, J.Appl.Phys., 85, 8, 1999
- [6] M.A. Sobolewski, J.Appl.Phys., 033301, 2005
- [7] M.A. Sobolewski, J.Appl.Phys., 95, 9, 2004
- [8] M.A. Sobolewski, J.Appl.Phys., 91,10, 2002
- [9] M.A. Sobolewski, Physical Review E, 62, 6, 2000
- [10] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of plasma discharges and materials processing, Wiley ,New York, 1994
- [11] F.F. Chen, Lecture Notes on Pinciples of plasma processing, Kluwer Academic, New York, 2003