

자화된 평판형 유도 결합 SF₆ 플라즈마의 특성

윤차근⁰, 도현호, 황기웅

서울대학교 전기공학과

The Properties of Weakly Magnetized Planar Type Inductively Coupled SF₆ Plasma

Cha-Keun Yoon, Hyun-Ho Doh, Ki-Woong Whang

Plasma Lab., Electrical Engineering Dep., Seoul National University

Abstract

The impedance characteristics and plasma parameters were experimentally studied in a weakly magnetized planar type, inductively coupled plasma (ICP) system. Compared with non-magnetized ICP system, higher power transfer efficiency, stable impedance matching, enhancement of plasma density and higher electron temperature can be obtained. Such improvements are mainly due to the excitation of deeply penetrating electromagnetic wave and reduction of radial loss of electrons. In particular, SF₆ (sulfur hexafluoride) plasma shows unstable impedance matching in non-magnetized ICP because electronegativity of SF₆ effects on plasma characteristics. But, magnetized inductively coupled SF₆ plasma shows enough impedance matching stability to be applicable to the polysilicon etching in semiconductor process.

1. 서론

반도체 제조 공정에 필요한 플라즈마를 발생시키기 위한 장치의 하나인 평판형 유도 결합 플라즈마(Planar Inductively Coupled Plasma) 시스템은 반응실 위쪽에 코일이 놓여있고 코일과 반응실은 쿼츠나 세라믹창으로 분리되어 있다. 코일에 13.56 MHz의 RF 전원을 인가하고 임피던스 매칭 상태를 만들면 코일에 큰 전류가 흐르게 되고, 이 전류는 시변하는 자장을 발생시키게 된다. 이렇게 발생된 시변하는 자장은 다시 패러데이 유도 법칙(Faraday's induction law)에 따라서 시변하는 회전 전장을 발생시키게 된다. 이 유도된 전장에 의해서 전자가 가속되어서 중성 기체 분자를 충돌을 통해 이온화 시켜서 플라즈마를 발생시키게 된다.[1][2]

현재 널리 사용되고 있는 고밀도 플라즈마 장치인 ECR이나 Helicon 장비는 플라즈마 발생실과 반응실이 분리되어 있기 때문에 생성된 고밀도의 플라즈마가 반응실로 확산되는 과정에서 플라즈마 밀도가 떨어지게 되는 단점이 있다. 또한 ECR과 Helicon에서는 플라즈마를 발생시키기 위해서 반드시 강한 외부 자장을 필요로 하고, 플라즈마의 균일도를 조정하기가 힘들며 기판의 면적을 증가시키는 것이 용이하지 않고 비용이 많이 든다. 이에 비하여 평판형 ICP는 기판 바로 위에서 플라즈마가 형성되므로 고밀도 플라즈마를 직접 반응에 사용할 수 있고, 플라즈마와 반응하는 기판의 면적을 늘리기 쉬우며 기본적으로 자장을 사용할 필요가 없으므로 비용이 싸고 설계가 간편하다는 장점이 있다.

그림 1은 본 연구에 사용된 평판형 ICP 장비의 개략도이다. 액체 질소를 이용한 기판의 극저온 냉각이 가능하도록 기

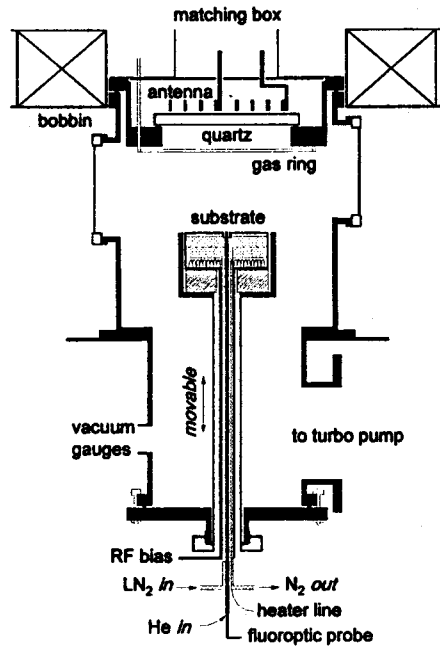


그림 1. 평판형 ICP 식각 장치의 개략도

판에 액체 질소를 공급하고 기판과 실리콘 웨이퍼사이의 열전도를 좋게하기 위하여 헬륨을 그 사이에 흘리도록 되어 있으며 이 판으로 fluoro optic probe를 실리콘 웨이퍼 뒷면에 접촉시켜서 공정시의 웨이퍼 온도 측정이 가능하도록 하였다. 기본적으로 평판형 ICP는 자장이 필요하지 않지만 본 실험에서는 코일부근에서 약한 자장을 형성시키기 위하여 보빈을 그림과 같이 설치한 것이 특징이다.

2. 자장 인가에 따른 방전 특성

자장이 인가되면 플라즈마의 성질이 상당히 달라지게 되는데 그 주된 원인은 전자가 자장에 의해 속박되면서 전기장과 자기장 모두에 수직된 방향으로 drift 운동이 발생하기 때문이다. 플라즈마를 conductivity tensor와 dielectric tensor를 가지는 유전체로 기술하면 이러한 성질을 잘 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 이에 따른 플라즈마 내부의 전자기파의 전파 현상도 개략적으로 파악할 수 있다. 전자의 열운동을 무시하면

conductivity tensor와 dielectric tensor를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{\perp} & \sigma_x & 0 \\ \sigma_x & \sigma_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\parallel} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{ne^2}{m} \cdot \frac{\nu + i\omega}{(\nu + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2}$$

$$\sigma_x = -\frac{ne^2}{m} \cdot \frac{\omega_{ce}}{(\nu + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2}$$

$$\sigma_{\parallel} = \frac{ne^2}{m} \cdot \frac{\nu + i\omega}{(\nu + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2}$$

$$\vec{\epsilon}_R = \vec{1} - i \frac{\vec{\sigma}}{\omega \epsilon_0}$$

이 식과 맥스웰 방정식을 이용하여 간단하게 축방향의 외부 자장이 없는 경우와 있는 경우에 대해서 반응실 내부의 전장과 자장을 시뮬레이션 할 수 있는데, 그 결과가 그림 2이다. 계산에 사용된 조건은 플라즈마 밀도가 $10^{11}/\text{cm}^3$, 전자와 중성 기체간의 충돌 주파수가 10 MHz (대략 3 mTorr 정도의 압력에 해당), 4 turn coil에 20 A의 여기전류, 그리고 축방향으로 10 Gauss의 자장을 가정하였다. 그림 2에서 쉽게 알 수 있는 것 처럼 10 Gauss 정도의 약한 자장이 인가 되더라도 반응실내의 전장과 자장의 분포 양상이 크게 바뀔을 알 수 있다. 외부 자장이 없는 경우에는 전력 전달이 skin layer로 국한 되지만, 자장이 있는 경우에는 전장이 플라즈마 내부로 깊이 침투하여 전체 체적으로 전력이 전달되고 있음을 알 수 있다. 이 시뮬레이션은 플라즈마가 챔버내에서 밀도가 모두 균일하고 전자의 열운동을 무시한다고 가정하였지만 실제로 플라즈마에 magnetic induction probe를 삽입하여 전자장을 측정하여 보면 축방향으로 주기성을 가지는 전자장을 관찰할 수 있다.[3] 전자장의 약한 주기성은 플라즈마내에 전자기파가 유기되는 것으로 생각할 수 있다. 여기서 발생하는 전자기파는 전자가 주로 관여하는 주파수 영역 $\omega < \omega_{ce}$ 에 존재하는 righthand circularly polarized 전자기파의 일종이며 whistler wave 또는 helicon wave라고 부르기도 한다. 이런 형태가 기존의 Helicon 플라즈마의 전자기파와 다른점은 우선 자장의 크기가 매우 작고, wave length가 안테나에 의해서 강제되는 것이 아니라 플라즈마 자체의 성질 즉 밀도, 사이클로트론 주파수, 충돌 주파수 등에 의해서 능동적으로 결정되어 진다는 점이다.

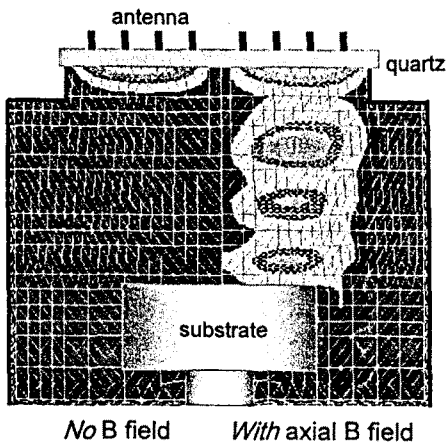
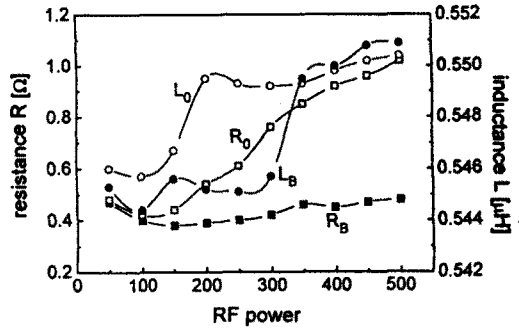


그림 2. 축방향으로 인가한 자장의 유무에 따른 E_0 의 분포

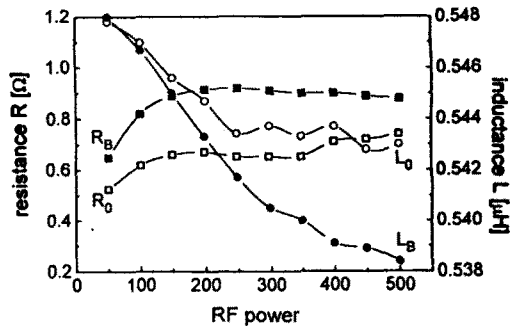
3. Ar, SF₆ 플라즈마의 전기적 특성 분석

유도 결합형 플라즈마는 그 특성상 RF 전력이 플라즈마 내부로 전달되는 과정을 변압기(transformer) 등가회로로 생각해서 전기적으로 간략화 할 수 있다. 여기서 문제가 되는 것은 이 유도성 플라즈마 부하의 저항과 인덕턴스가 고정되어 있지 않고, 모든 주변 변수들의 영향아래서 변화하는 것이 중요한 점이다. 플라즈마 부하에 전력이 최대로 전달되게 하기 위해서는 부하의 임피던스와 RF 출력단의 임피던스가 매칭(matching)되어야 한다. 임피던스 매칭을 위해서는 코일 입력단에 매칭박스를 부착하여야 한다. 평판형 ICP는 유도성 부하(inductive load)이므로 일반적으로 2개의 진공 커패시터 C₁과 C₂를 이용한 회로를 사용한다. RF 전원의 출력단은 R₀ = 50 Ω으로 표준화(normalized)되어 있으므로, 임피던스 매칭 상태를 만들게 되면 회로의 R, L값으로부터 C₁, C₂값을 구할 수 있다. 역으로 C₁, C₂를 알 수 있는 경우도 R, L값을 구할 수가 있다. 일반적으로는 부하의 임피던스를 측정하기 위하여 Godyak[4]과 같이 매칭회로와 부하사이에 전압과 전류 프로브를 설치하여 플라즈마 부하의 임피던스를 측정하지만, 본 실험에서는 임피던스 프로브(impedance probe)를 매칭회로의 입력단에 설치하여 매칭회로를 포함한 회로의 임피던스를 측정하고 C₁과 C₂의 값을 이용하여 R, L값을 계산하였다.[5]

그림 3의 (a)에서는 이렇게 계산된 아르곤(Ar) 플라즈마의 입력 전력에 따른 R, L값을 자장의 유무에 따라서 보여주고 있다. 자장이 가해지지 않은 일반적인 유도 결합형 플라즈마의 경우에는 저항은 입력 전력의 증가에 따라서 증가하고 인덕턴스는 감소하는 경향을 보여서 Q값이 작아지게 되어 매칭 영역이 넓어지고 안정되어 진다. 여기서 10 Gauss 정도의 약한 자장을 축방향으로 인가해 주게 되면, 전체적으로 저항이 증가하고 인덕턴스가 낮아져서 더욱 안정되게 전력을 전달할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 그림 3의 (b)에서 SF₆ 플라즈마의 경우에는 일단 먼저 자장을 인가하지 않은 경우를



(a) Ar 플라즈마 (20 sccm, 10 mTorr, 자장 10 Gauss)



(b) SF₆ 플라즈마 (20 sccm, 10 mTorr, 자장 10 Gauss)

그림 3. 입력 전력에 따른 R, L값의 변화

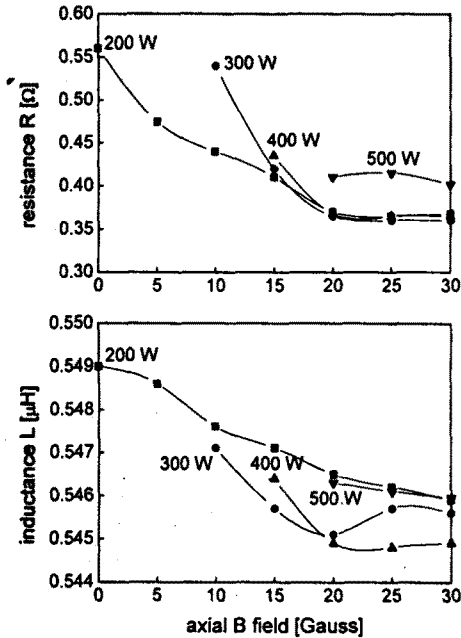
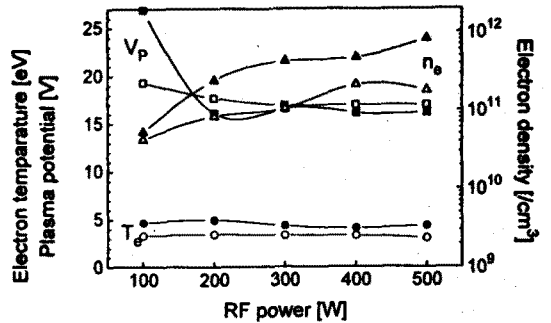


그림 4. 자장의 세기에 따른 SF₆ 플라즈마의 R, L값의 변화

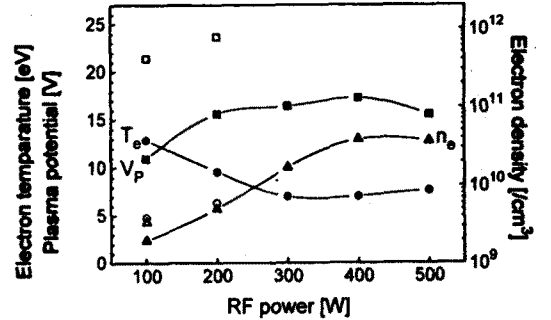
보면 인덕턴스의 변화가 아르곤 플라즈마와는 다른 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 더우기 200 W 부근에서는 인덕턴스가 급격히 증가하여 임피던스 매칭이 불가능한 상태가 되어서 power를 효과적으로 전달할 수가 없었다. 이 이유는 SF₆ 가스의 특성인 electronegativity[6]에 의해서 방전시에 많은 음이온(negative ion)들이 생성되어 전기적 성질이 달라지기 때문이라고 생각된다. 이전의 ECR 장치에서는 SF₆ 가스를 방전시킬 때 이러한 문제가 발생하지 않았지만, 유도 결합형 플라즈마는 플라즈마 자체의 전기적 성질이 전력 전달에 가장 중요한 조건이 되므로 이러한 문제가 발생한다고 생각된다. 이와 같이 그 특성상 방전이 불안정한 SF₆ 플라즈마에 역시 약자장을 인가하게 되면 그림에서 볼 수 있는 것처럼 인덕턴스가 크게 감소하여 어느 정도까지는 매칭을 안정화시킬 수가 있음을 확인하였다. 그림 4에서는 자장의 세기에 따른 저항과 인덕턴스의 변화를 나타내었는데 20 Gauss 정도의 자장이면 500 W 정도의 전력을 안정적으로 전달할 수 있음을 확인하였다.

4. Ar, SF₆ 플라즈마 변수의 측정

플라즈마 변수들의 자장에 대한 의존성은 Langmuir probe 실험을 통해서 Ar과 SF₆ 플라즈마에 대해서 확인하였다. 그림 5는 10 mTorr에서의 각각의 플라즈마 전위, 전자 온도, 그리고 전자밀도를 입력 전력을 증가시키면서 자장의 유무에 따라서 구한 것이다. 일반적으로 플라즈마 밀도는 자장이 인가된 경우에 증가 하였다. 이것은 전력 전달 효율의 증가와 자장에 의한 전자의 confinement에 그 원인이 있다. 전자 온도 역시 전자 가열이 효율적으로 일어나서 약간 올라가는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 플라즈마 전위는 약간 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 쿼츠창의 오염이나 스퍼터링등의 문제를 완화시키는 쪽으로 작용할 것이 기대된다. 그 밖에도 반



(a) Ar 플라즈마 (20 sccm, 10 mTorr, 자장 10 Gauss)



(b) SF₆ 플라즈마 (20 sccm, 10 mTorr, 자장 10 Gauss)

그림 5. 입력 전력에 따른 플라즈마 변수들의 변화

경방향으로의 전자의 확산이 자장에 의해서 저지되기 때문에 반경방향으로의 밀도 균일성이 향상되는 결과도 보여주었다. 이러한 결과들은 플라즈마 모델링을 통한 시뮬레이션 결과와도 일치하였다.[7]

5. 결론

평판형 유도 결합 플라즈마 장치에 축방향으로 약한 자장을 인가하는 경우에 플라즈마 내부로 전자장이 깊이 침투하여 전력전달 효율이 향상되고 임피던스 매칭이 안정됨을 확인하였다. 특히 SF₆ 플라즈마의 경우에는 자장을 가하지 않은 경우에는 저압에서의 실험이 불가능하였지만, 20 Gauss 정도의 자장을 인가하여 반도체 식각 공정에 필요한 500 W 정도의 전력을 안정적으로 공급할 수 있게 되었다. 자장 인가에 따른 플라즈마 변수들의 변화도 관찰하여 그 특성이 개선됨을 보였다.

Reference

- [1] J. Hopwood, Plasma Sources Sci. Technol., 1, 109, 1992
- [2] J. A. O'Neil et al., J. Appl. Phys., 73(4), 1621, 1993
- [3] H. J. Lee et al., Proceeding of the 12th Symposium on Plasma Processing, Japan, 485, 1995
- [4] R. B. Piejak, V. A. Godyak and B. M. Alexandrovich, Plasma Sources Sci. Technol., 1, 179, 1992
- [5] 양일동, 이호준, 황기웅, 1994년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 281, 1994
- [6] B. M. Smirnov, Negative Ions, McGraw-Hill, 1982
- [7] 김윤택 외, 한국전공학회지 제3권 4호, 457, 1994