

반도체 공정용 플라즈마원

정진욱*, 이용관*, 장홍영**

(*플라즈마트 기술연구소, **KAIST 물리학과 교수)

과거 수십 년 동안, 플라즈마를 이용하는 많은 반도체 장비들이 개발되어 왔다. 그리고 플라즈마를 이용하는 공정에서는 낮은 공정 압력, 높은 이온화율, 높은 에칭속도, 에칭 균일도라는 공통적으로 요구되는 조건들을 충족하기 위해 새로운 여러 가지 고밀도 플라즈마(High Density Plasma, HDP) 발생 장치들이 출현하게 되었다.

기존의 축전 결합 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma, CCP)는 보통의 공정 압력에서 $10^8\text{-}10^{10}\text{cm}^{-3}$ 정도의 낮은 이온 밀도를 갖는 반면, 고밀도 플라즈마 장치들은 10^{11}cm^{-3} 이상의 높은 밀도를 발생시킨다^[1]. 대부분 HDP 장치들의 큰 장점 중의 하나는 기존 축전 결합 플라즈마와 달리 플라즈마 발생에 필요한 전원들(고주파 및 마이크로파)을 플라즈마 전위를 독립적으로 조절할 수 있다는 것이다.

기판(substrate) 위의 플라즈마 전위를 독립적으로 제어함으로써 높은 에너지를 가진 이온들에 의한 웨이퍼 손상을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라, 공정 물질에 따라 이온 에너지 분포를 제어할 수 있어 공정 제어의 최적화가 가능하다.

웨이퍼(wafer)에서 공정의 균일성을 확보하기 위해 플라즈마의 공간적 균일성 또한 장비 개발에 있어 확보해야 할 중요한 요소인데 현재 반도체 공정에서는 각 공정에 따라 가장 최적의 특성을 가진 플라즈마 장치들이 이용되고 있으며, 에칭 공정에서는 아직까지 축전결합 플라즈마 장치가 많이 이용되고 있다.

다음 내용은 각종 플라즈마 원들과 플라즈마 발생 원리 및 특징들을 간략히 소개하고 최근 많은 주목을 받고 있는 유도 결합 플라즈마(ICP)에 대해 조금 더 자세히 다루고 있다.

1. 축전 결합 플라즈마 장치

반도체 제조 공정에서 가장 널리 사용되어 온 장치가 축전 결합 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma, CCP) 장치이다. 그림 1은 전형적인 고주파 축전 결합 플라즈마 장치의 단면도들이다. 기본적인 장치의 구조는 일정한 간격으로 유지되어 있는 두 전극판이 있고, 이 두 전극판에 고주파 전원이 가해진다. 이 장치는 넓은 공정 압력에서 운용이 가능하며, 박막 증착 및 에칭 등의 공정에 널리 이용되어 왔다 (표 1).

낮은 압력에서 파워가 인가된 전극에 웨이퍼를 장착하여 에칭하는 장비(그림 1b)를 RIE(reactive ion etching)라 하는데 높은 에너지의 이온이 웨이퍼에 입사하므로 주로 이방성 에칭에 사용된다. 그림 1a는 웨이퍼를 접지 전극에 장착하는 플라즈마 에칭이라 불리는 장치의 구조이다. 강한 이온 에너지를 사용하는 것보다 플라즈마내에 발생한 각종 활성종들로 에칭을 수행하는 플라즈마 에칭 장비는 높은 공정 압력에서 사용되며, 박막 증착 및 등방성 에칭(isotropic etching)에 주로 이용되고 있다.

축전 결합 플라즈마의 발생 원리는 다음과 같다. 전극에 고주파 전원을 인가하면 운동성이 좋은 전자들이 전기장에 반응하여 전기장으로부터 에너지를 얻게 되어 중성원소와 충돌하고 그것들을 이온화 시키면서 플라즈마가 발생하는 것이다. 결국 공정 플라즈마에서의 방전 원리는 전자가 전기장으로부터 어떻게 에너지를 얻게 되는냐에 의해 결정된다.

한편 이온들은 고주파 전기장에 반응하지 못하므로 전기장

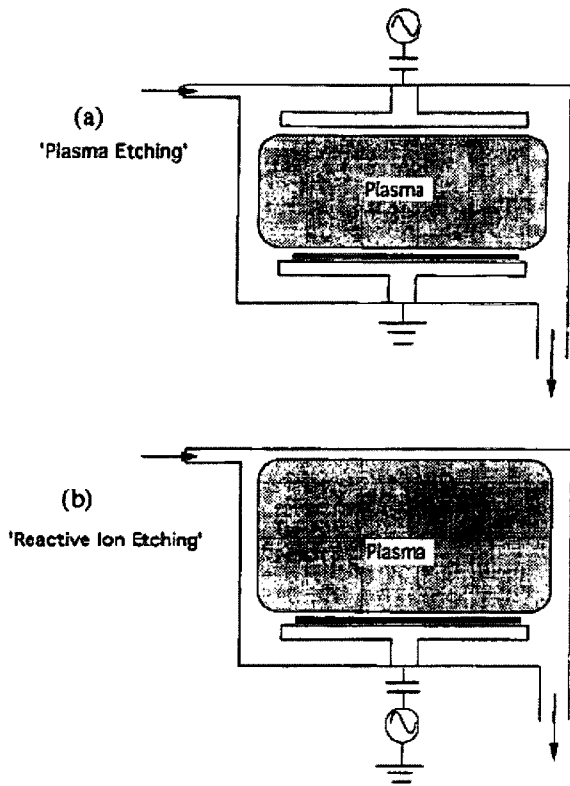


그림 1. 축전 결합방전 플라즈마 반응기
 (a) 플라즈마 에칭(etching)
 (b) 활성이온 에칭(Reactive Ion Etching (RIE))⁽¹⁾

으로부터 에너지를 거의 얻지 못한다. 플라즈마 가장자리에 서는 쉬스(sheath)가 형성되며 이 쉬스에서 이온이 가속되어 플라즈마를 빠져나간다. 플라즈마는 전기적으로 중성을 유지 하려는 성질 때문에 플라즈마 전위는 항상 전극의 전위보다 높다. 따라서 축전결합 플라즈마에서는 전극의 전위가 양일 때, 플라즈마 전위가 그 전위를 거의 따라 가게 된다.

웨이퍼(wafer)에 입사하는 이온 에너지 분포는 플라즈마 전위와 웨이퍼 표면의 전위 차에 의해 결정되지만 구동 주파수에 따라 다른 양상을 가진다. 예를 들면 이온 플라즈마 진동수보다 구동 주파수가 높은 경우에는 입사하는 이온 에너지 분포가 두 전위 차를 중심으로 분포하게 되지만, 이온 플라즈마 진동수보다 낮은 경우에는 이온이 구동 주파수에 충분히 반응할 수 있게 되어 이온의 에너지 분포는 두 전위 차를 중심으로 두 개의 봉우리를 갖는 분포가 된다.

따라서 에칭하고자 하는 박막의 문턱 에너지와 플라즈마 내 이온의 종류에 따라 wafer에 인가할 주파수를 결정하여야 한다. 박막의 응력 및 박막 조성비의 제어를 위해서는 높은 이온 에너지가 SiN 박막 증착과 같은 공정에서 유용하지만 선풍이 작고, 고선택비 및 기판 손상 등을 제어해야 하는 차세대 공정에서는 이온 에너지가 독립적으로 제어되어야 한다. 축전결합 플라즈마 장치들은 표 1에서 제시된 바와 같이 낮은 압력(20 mTorr)에서는 효율적인 작동이 불가능하다. 낮은 공정 압력에서도 높은 이온 밀도와 기판에 입사하는 이온들의 에너지를 낮추기 위해 MERIE (Magnetically Enhanced Reactive Ion Etcher)가 개발되었다⁽²⁾.

표 1. 축전 결합 방전과 고밀도 플라즈마 장치들의 전형적인 플라즈마 조건들⁽¹⁾

플라즈마 변수	축전 결합 방전(CCP)	고밀도 플라즈마(HDP)
공정 압력	20-2000 mTorr	0.5-50 mTorr
rf 출력	50-2000 W	100-5000 W
rf 주파수	0.05-13.56 MHz	0-2450 MHz
반응 용기 부피	1-10 l	2-50 l
플라즈마 단면적	300-2000 cm ²	300-500 cm ²
외부 자기장	0-100 G	0-1 kG
플라즈마 밀도	10 ⁹ -10 ¹¹ cm ⁻³	10 ¹⁰ -10 ¹² cm ⁻³
전자 온도	1-5 eV	2-10 eV
플라즈마 전위	~ 10 ² V	~ 10 V
이온 선속	0.1-5 mA cm ⁻²	5-50 mA cm ⁻²
이온 가속 에너지	200-1000 eV	200-500 eV
이온화율	10 ⁻⁴ -1 %	10 ⁻² -10 %

2. 고밀도 플라즈마 발생 장치

앞에서 언급한 것 같이 저압에서도 높은 이온 밀도와 고효율의 플라즈마를 발생시키기 위해 고밀도 플라즈마 장치의 개발이 요구되었다. 이렇게 개발되어진 고밀도 플라즈마 발생 장치들이 그림 2에서 그림 4에 나와 있다.

이러한 고밀도 플라즈마의 공통적인 특징을 살펴보면, 우선 50mTorr 이하의 낮은 압력에서도 방전 효율이 높고 안정적으로 플라즈마를 발생시키며, 표 1에서 나타난 바와 같이 기존의 축전 결합 방전에 비해 훨씬 높은 플라즈마 밀도를 얻을 수 있다는 것이다.

뿐만 아니라 고주파 입력 파워가 두 전극(그중 하나에 웨이퍼가 놓임) 사이에 가해지는 기존의 축전 결합 플라즈마와는 달리 고주파나 마이크로파 파워가 기판과는 별도로 플라즈마에 가해짐으로써 기판에 입사하는 이온의 에너지와 이온 선속을 독립적으로 제어할 수 있다. 입력 파워가 플라즈마에 축전 결합으로 인가되지 않기 때문에 플라즈마 전위가 20-30V 정도로 낮고 따라서 높은 에너지 이온들에 의한 기판 손실을 최소화할 수 있다. 이러한 장비들은 현재 다양한 공정에 응용되

어 상업적으로 큰 성공을 거두기도 하였으며, 고밀도 플라즈마 발생 원리와 많은 응용 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러면 구체적으로 대표적인 고밀도 플라즈마 원들을 살펴보자.

2.1 전자 사이클로트론 공진 플라즈마 (Electron Cyclotron Resonance (ECR))

마이크로파를 이용한 플라즈마 장치는 세계 2차 대전 중에 개발된 고출력 마이크로파 전원이 개발된 이후 사용되어져 왔다. 그림 2는 한때 플라즈마 공정에 사용되어져 큰 성과를 거둔 일반적인 ECR 플라즈마 장치이다. 이 장치에서는 2.45GHz의 마이크로파가 도파관(wave guide)을 통해 플라즈마로 전달되며, 이 도파관은 장치의 수정(quartz) bell jar로 연결된다. 솔레노이드 코일은 발산하는 정자기장을 만들며, 875G⁽³⁾ 부근에서 전자 사이클로트론 공진 영역이 형성된다. 도파관을 통해 플라즈마로 가해진 마이크로파의 에너지는, 자기장을 중심으로 회전하는 전자의 회전 진동수가 마이크로파의 진동수와 일치하게 되는 공진 영역에서 아주 효과적으로 전자에게 전달된다.

전자 사이클로트론 공진 플라즈마 장치는 이러한 공진을 이용하므로 10⁻⁵ Torr 이하의 매우 낮은 압력에서도 플라즈마 발생이 가능하다. 압력이 감소함에 따라 예칭의 비용이 상승하기 때문에 실제의 공정에서는 대부분 1mTorr에서 20 mTorr 사이에 사용한다.

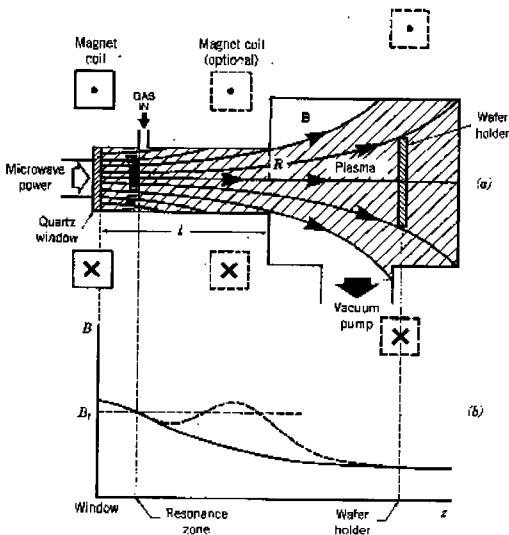


그림 2. 일반적인 ECR 플라즈마 반응기 (a) 기하적인 배치 (b) 축방향의 자기장 분포⁽³⁾

2.2 헬리콘 플라즈마(Helicon Plasma)

플라즈마 내에 발생한 전자파가 전자에게 에너지를 전달하

여 고효율의 헬리콘 플라즈마를 발생시킨다(그림 3). 이 장치는 Boswell⁽⁴⁾에 의해 고밀도 플라즈마 원으로 처음 소개되었다.

헬리콘(휘슬러) 파(波)와 플라즈마와의 파워 전달 메커니즘은 프란시스 첸(F. F. Chen)⁽⁵⁾이 제시한 란다우 감쇠(Landau Damping)로 알려져 있는데 최근 다른 이론들이 계속 제시되고 있어 물리 연구에 관심을 불러 일으키고 있는 플라즈마이다. 헬리콘 파는 다양한 형태의 안테나에 의해 발생되고, ECR에 비해 비교적 약한 자기장을 따라 전파하면서 플라즈마와 유도 결합으로 이루어진다.

헬리콘 플라즈마 밀도는 인가한 자기장의 세기에 거의 비례하는 경향을 가진다. 자기장을 사용하기 때문에 자기장에 수직으로 균일한 플라즈마 발생에는 큰 어려움이 있어 실제의 공정 장비에는 잘 이용되고 있지 않지만 다른 고밀도 플라즈마 장치에 비해 아주 높은 밀도의 플라즈마를 만들 수 있는 장점이 있어 핵융합 연구, 추진체(Thruster) 그리고 이온 원으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

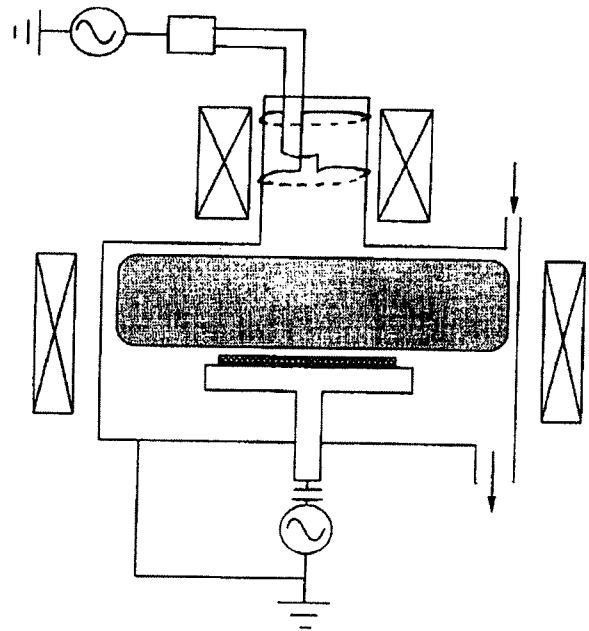


그림 3. 일반적인 헬리콘 플라즈마 개념도⁽²⁾

2.3 유도 결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma (ICP))

그림 4는 플라즈마를 이용하고 있는 공정에서 가장 많이 이용되고 있는 플라즈마 발생 장치인 유도 결합 플라즈마 장치의 단면도들이다. 이 장치는 전자파와 플라즈마의 결합(Coupling)이 유도 결합(Inductively Coupled)으로 이루어

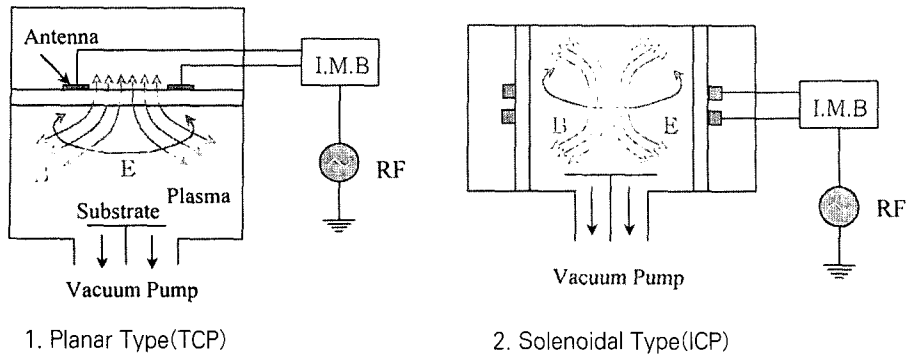


그림 4. 유도결합 플라즈마 개략도 (1) 원통형 (2) 평판형

지며 유도 전기장(inductive electric field)에 의해 에너지를 얻은 전자에 의해 플라즈마가 발생된다.

앞에서 언급한 고밀도 플라즈마 발생 장치들에 비해 플라즈마 발생 효율이 비교적 낮지만 자기장을 사용하지 않기 때문에 구조가 간단하며 넓은 공간에 균일한 플라즈마 달성이 쉽고 장치의 대면적화가 쉽다. 이러한 이유로 최근 12인치 이상의 웨이퍼 공정이 가능한 대면적 유도 결합 플라즈마 장치의 개발이 활발하다.

유도결합 플라즈마 장치의 효율을 높이기 위해 약한 자기장을 축 방향으로 가하기도 하며 다양한 형태의 유도 결합 플라즈마 장치들을 고안하였다. 유도 결합 플라즈마 역시 기판으로 입사하는 이온의 에너지를 독립적으로 제어할 수 있는 장점이 있다.

이제 유도 결합 플라즈마에 대해서 더 구체적으로 알아보자. 그림 5는 유도 결합 플라즈마의 등가 회로를 나타낸 것이다. 안테나가 일차코일이며 플라즈마가 이차코일이 되어 마치 변압기(Transformer)와 같은 구조가 된다. 이때 플라즈마 내에 유도된 플라즈마 전류의 방향은 렌즈의 법칙을 따라 안테나에 의해 발생된 유도 자기장을 상쇄시키는 방향이 된다. 실제 유도 결합 플라즈마의 파워 전달은 변압기와 유사한 특성을 가진다⁽³⁾. 유도결합 플라즈마는 입력파워에 따라, 안테나와 용기(reactor) 접지(ground)와의 축전결합이 주된 E-mode(낮은 플라즈마 밀도)와 안테나 전류와 플라즈마 전류 사이의 유도결합에 의한 H-mode(높은 플라즈마 밀도)로 두 개의 모우드(mode)가 존재한다. 입력파워가 낮을 때 안테나 전류와 유도결합을 할 수 있을 정도로 플라즈마 밀도가 충분하지 않기 때문에 유도 결합보다 축전결합이 주된 결합(Coupling)이 된다. 입력파워를 증가시켜주면 저밀도 모우드에서 고밀도 모우드로 전이가 일어나는데 이를 E-H 전이(transition)이라고 하며 이러한 전이파워(Transition power)는 압력과 구동 주파수의 함수가 되는 것으로 알려져 있다⁽⁶⁾. 이러한 전이현상은 입력파워를 올려줄 때와 내려줄

때에 각각 다른 값이 되는 이력현상(hysteresis)이 있어 그 연구가 활발하다.

저압(10mTorr 이하)에서 유도결합 플라즈마에서의 전자의 가열 메카니즘 연구가 최근 활발하다. 전자의 평균자유행로가 용기(reactor)크기보다 커 살갓 영역(skin layer)안의 전기장과 전자 사이에 공진이 저압 유도플라즈마의 방전의 메카니즘으로 밝혀졌다^(7,8). 이러한 공진(resonance)으로 인해 전자 온도가 주파수 의존도를 가지게 되는데 이러한 현상을 이용하면 전자온도를 공정에 맞게 조절할 수가 있다⁽⁸⁾. 최근 13.56MHz에서 약한 자기장을 인가한 유도결합 플라즈마에서 2.45GHz에서 볼 수 있는 전자 싸이클로트론 공진이 현상이 전자에너지분포함수 측정을 통해서 관찰되었으며 이러한 13.56MHz에서 전자 싸이클로트론 공진은 2.45GHz 경우와 달리 낮은 전자를 주로 가열시키며 공진 자기장에서 전자온도가 최대가 되었다⁽⁹⁾.

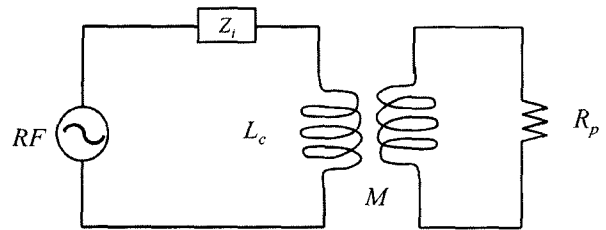


그림 5. 유도 결합 플라즈마의 등가회로

참고 문헌

(1) D. B. Graves, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 22, p. 30 (1994).
 (2) C. T. Gabriel and J. P. MoVittie, Solid State

Technol. 81 (1992).

- [3] M. A. Lieberman and A J. Lichtenberg, Principles of plasma discharges and materials processings, (John Wiley & Sons, Inc. 1994).
- [4] R. W. Boswell, Phys. Lett. A33, 457 (1970).
- [5] F. F. Chen, Plasma Phys. and Control. Fusion 33, 339 (1991).
- [6] N. S. Yoon, et. al., IEEE Transactions Plasma Science, 26, 190 (1998).
- [7] ChinWook Chung, et. al. J. of Applied Physics, 88, 1181 (2000).
- [8] ChinWook Chung, et. al. Physics of Plasmas, 8, 2992 (2001).
- [9] ChinWook Chung, et. al. Phys. Rev. Lett. (accepted and to be published, 2002).

〈 저 자 소 개 〉



정진욱

1994년 고려대학교 물리학과 졸업, 1997년 KAIST 물리학 석사 졸업, 2001년 KAIST 물리학과 박사취득. 현재 플라즈마트 연구소 소장. 관심연구 분야로는 유도결합 플라즈마에서의 전자 가열 수송메카니즘 연구, 대면적 플라즈마 원 개발, 대기압 플라즈마 개발 및 진단, 강한 자기장에서의 플라즈마 진단 등.



이용관

1995년 KAIST 물리학과 졸업, 1997 KAIST 물리학과 석사 졸업, 현재 플라즈마트 기술 연구소 주임연구원. 대면적고밀도 플라즈마원 개발 등 (특허 6건). 관심분야는 MEMS 공정 및 대기압 플라즈마 개발, 플라즈마를 이용한 표면처리, 차세대 공정개발 등.



장흥영

서울대학교 원자력공학과 졸업, 1980년 KAIST 석사 졸업, 1986년 Univ of Iowa 박사, Lehigh 대학 박사후 연수, 1987년 이후 KAIST 물리학과 교수. 관심분야는 공정 플라즈마 물리, 플라즈마 모델링, 토카막 플라즈마, 차세대 공정을 위한 플라즈마 원 개발 등.