

| 반도체 공정용 플라즈마 발생장치의 종류와 특성

이상원 소장
((주)플라즈마트 기술연구소)

1. 서론

반도체 제조 공정은 증착, 식각, 이온주입, 세정 등과 같은 현대의 최첨단 과학기술이 집약되어 있다. 이러한 공정들을 수행하기 위해 1960~1970년대에는 약품을 이용한 습식공정을 사용했으나, 반도체 소자의 크기가 작아짐에 따라 더 이상 습식공정은 적용이 불가능해 졌고, 현재는 대부분의 박막 증착, 식각 공정에서 플라즈마가 사용되고 있다.

플라즈마 발생장치는 해당 장치가 사용되는 공정에 있어서 절대적으로 중요한 위치를 차지하고 있다. 플라즈마 발생장치의 오동작, 또는 특성 변화는 곧바로 공정 결과에 직접적인 영향을 미치므로, 매우 높은 안정성 및 재현성이 요구된다.

반도체 제조 공정에 사용되는 플라즈마 발생장치는 해당 공정의 특성에 따라 다른 형태를 사용하는데, 여기에서는 크게 식각 공정과 증착공정에 사용되는 플라즈마 발생장치에 대해 알아본다.

2. 플라즈마 발생장치 소개

2.1 식각 공정용 플라즈마 발생장치

2.1.1 Planar and Cylindrical Diode systems

고 에너지 이온들이 식각 속도를 높이는데 결정적인 역할을 한다는 것이 알려지면서 1970년 대에는 평판형 또는 원통형 다이오드 형태의 식각 장비가 널리 사용되었다. 이 장비에서는 웨이퍼가 RF전원에 연결된 전극 위에 놓이게 되는데 이때 전극과 RF 전원 사이에는 Blocking Capacitor가 삽입되었다. Blocking Capacitor는 RF Cycle 동안 플라즈마로부터 오는 전자에 의한 전류와 이온 전류의 양을 맞추어 줌으로써 전극으로부터 RF 전원으로 실제 전류(전자전류)가 흐르는 것을 막아준다. 전자는 이온보다 이동도(Mobility)가 크기 때문에 플라즈마 주변의 벽이라든가 웨이퍼가 놓여진 전극 등을 플라즈마 보다 전위가 낮은 상태로 만드는데 이러한 전위는 결국 전자와 이온의 선속(Flux)을 맞추어 주는 역할을 하게 된다. 이때 생성되는 음전위를 자가 바이어스 전위(Self-bias Voltage)라고 하며 이

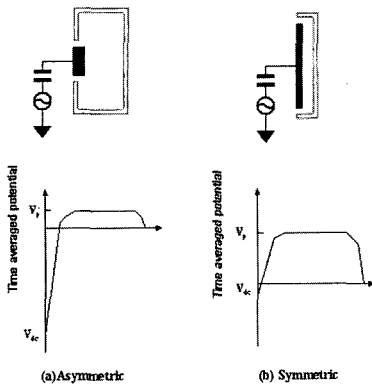


그림 1. Planar Diode System.

전위는 이온에게 에너지를 주는 역할을 하게 된다. 여기서 더욱 중요한 사실은 전극에 인가되는 RF 전원의 파워를 조절하면 바이어스 전압을 조절할 수 있어 궁극적으로 이온의 에너지를 조절할 수 있다는 점이다.

한편 이러한 방법은 표면에 도달하는 양전하와 음전하의 양이 같기 때문에 피처리물의 표면이 쉽게 전하에 의해서 대전되지 않는 특징이 있다. 평판형 다이오드 시스템은 이온에 에너지를 인가할 수 있고 그 에너지를 조절할 수 있다는 장점이 있었지만 문제점과 한계도 동시에 드러냈다.

첫번째 문제점은 반응기의 형태가 플라즈마의 방전 특성에 큰 영향을 끼친다는 것이다. 이는 스퍼터링을 이용한 증착장비에서 잘 알려진 현상으로 플라즈마가 접한 반응기의 면적과 RF가 인가되는 전극의 면적에 따라서 플라즈마 전위가 심하게 변한다.(그림1) 전극의 면적이 플라즈마가 접하고 있는 다른 면적보다 훨씬 작다고 한다면 (비대칭형, Asymmetric Type) 플라즈마 전위는 상대적으로 작을(약 수십 V) 것이다. 하지만 전극과, 전극을 제외한 다른 부분의 면적이 비슷하다면(대칭형, Symmetric) 플라즈마 전위는 RF 전압과 비슷할 정도로 높아지게(약 수백 V) 된다. 여기서 중요한 것은 비대칭형 반응기에서는 플라즈마 전위(V_p)는 수십 V 정도로 작지만 Self-bias 전압이 아주 커서 결국 이온이 얻게 되는 에너지는 높아지게($V_p + V_{dc}$) 되며 반면에 접지

된 반응기로 입사하는 이온의 에너지는 낮다($\sim V_p$)는 사실이다. 한편 대칭형 반응기에서는 전극 뿐만 아니라 접지된 반응기 벽으로도 상당한 크기의 에너지를 가진 이온들이 입사하게 된다. 이러한 이유로 벽이나 주변의 구조물들의 표면이 이온들에 의해서 스퍼터될 수 있으며 이때 나온 입자들이 웨이퍼 손상이나 공정 실패의 요인이 될 수 있다. 특히 공정 압력이 낮은 경우에는 플라즈마와 전극 및 반응기 벽과의 전압이 높아지고 평균 자유행로가 길어지기 때문에 이러한 문제는 더욱 심각해질 수 있다. 비대칭형과 대칭형 전극 구조를 갖는 반응기 중 언뜻 보기에는 비대칭형의 반응기가 공정에 유리할 것 같지만 비대칭형은 플라즈마 및 공정의 균일도 측면에서는 상당히 많은 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 비대칭형 구조에서는 중앙 부분의 플라즈마 밀도가 높고 바깥쪽이 낮은 현상이 발생하는데 이것은 벽 주위에서 전자와 이온들의 대량 손실이 발생하기 때문이며 이러한 공정의 불균일성 문제는 대량생산을 필수로 하는 공정에선 치명적인 결함이 된다. 결과적으로 반도체 제조용 식각장비에서는 대칭형 구조가 많이 사용되며 위에서 언급했던 대칭형 구조의 문제점인 반응기 벽면의 스퍼터링 문제는 100 mTorr 이상의 높은 압력을 사용하는 것으로 보완하였다.

평판형 다이오드 방식 외에 원통형 다이오드 방식도 유행하였는데 그 중 대표적인 것이 6각 기둥 형태의 전극에 웨이퍼를 고정시켜 식각을 수행하는 일명 'Hexode System'이 있다. 이 시스템은 반응기 중앙에 6각 기둥 모양의 전극이 있었는데 이 전극의 면적은 반응기 내벽의 면적보다 작았기 때문에 비대칭형에 가까웠고 이러한 특성으로 비교적 낮은 압력에서도 벽면 스퍼터링에 의한 문제가 발생하지 않았으며 플라즈마의 균일도 또한 우수하여 많이 사용되었지만 매엽식 장비가 들어오면서 차츰 자취를 감추게 되었다.

평판형 또는 원통형 다이오드 방식의 두 번째 한계는 고정된 가스 압력이나 RF 주파수에서 이온의 에너지나 이온의 선속(Flux)을 독립적으로 제어할 수 없다는 점이다. 예를 들면 GaAs wafer를 Cl_2 가스로 5 mTorr의 압력에서 100 eV 이하의 이온에너지로(웨이퍼 손상이나 선택비 문제로 인하여) 식각하

려고 플라즈마를 방전한다면 플라즈마 밀도가 너무 낮아지게 되어 식각속도가 현저하게 낮아지게 된다. 즉, 이온의 에너지를 줄이기 위해서 전극에 인가하는 전력을 줄이면 플라즈마의 밀도도 동시에 낮아지는 현상이 발생하게 된다.

2.1.1 Dual Frequency Planar Diode and Triode System

위에서 언급한 문제를 풀기위해서 최근에 상부 전극에는 고주파를 인가하고 하부전극에는 저주파를 인가하는 이중 주파수 삼중전극 또는 이중 주파수 이중전극 시스템이 많이 사용되고 있다. 상부전극의 경우에 높은 주파수를 인가할 때가 낮은 주파수를 인가할 때보다 전압이 낮아지게 되는데 이러한 이유로 고주파(주로 수십 MHz)를 소스 전원으로 사용할 경우 상부 전극에 입사하는 이온들의 에너지를 작게 유지하면서도 많은 전력을 인가할 수 있게 된다. 반면 하부 전극에는 수백 kHz에서 10 MHz 사이의 낮은 주파수의 전원을 인가하는데 이때는 비교적 낮은 전력을 인가해도 높은 이온 에너지를 얻을 수 있다. 이런 식으로 고주파를 인가하는 상부 전극으로 플라즈마 밀도를 조절하고 낮은 주파수를 인가하는 하부 전극으로 이온의 에너지를 조절할 수 있는 것이다.

최근에는 이중 주파수 이중 전극 시스템도 많이 사용되는데 그 이유는 이중 주파수 삼중 전극의 경우 상부 전극과 하부 전극이 따로 있기 때문에 상부 전극의 시스템 구성 비용이 많이 들게 되고 구조도 복잡하여 하부 전극에 두 종류의 주파수를 동시에 인가하는 시스템이 개발되기도 하였다. 이 시스템에서도 플라즈마 밀도와 이온의 독립적 조절이 가능할 뿐만 아니라 시스템이 더욱 간단하다는 것이 특징이다.

2.1.2 Inductively Coupled Plasmas

1980년 대 후반과 1990년 대 초반에는 민감한 공정들이 등장하면서 낮은 이온에너지를($< \sim 100$ eV) 갖는 플라즈마 식각 장치의 필요성이 대두되었다. 이러한 필요성은 식각 속도는 그대로 유지하면서 더욱 높은 선택비를 확보하고 이온에 의한 손상을 최소화하기 위해서 생겨났다. 식각 속도는 이온의 에너지에 대체적으로 비례하기 때문에 이온의 에너지를 줄이면서 식각 속도를 유지하기 위해서는 이온의

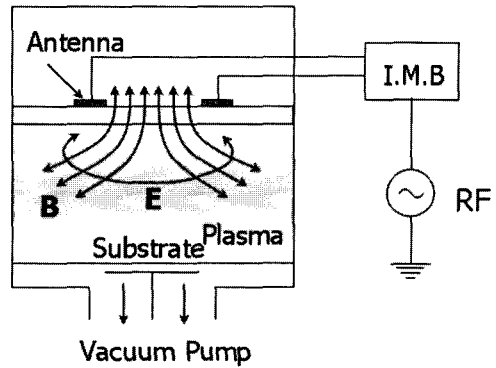


그림 2. ICP의 구조.

선속(Flux) 즉, 이온 전류를 증가시켜야 한다. 보통 평판형 이중전극 시스템이나 삼중전극 시스템의 경우 축전 결합형 플라즈마에 속하는데 이들은 약 $10^9 \sim 10^{10}$ cm⁻³의 플라즈마 밀도를 형성하므로 이온 전류는 약 1 mA/cm² 정도이다. 이온의 에너지를 낮추면서 식각 속도를 유지하기 위해서는 약 10 mA/cm² 정도의 이온 전류가 필요하고 이를 위해서는 약 $10^{11} \sim 10^{12}$ cm⁻³의 밀도를 갖는 플라즈마 소스가 필요하다.

13.56 MHz 축전 결합형 플라즈마의 경우 높은 이온 에너지와 이들에 의한 스퍼터 현상에 의해서 전력의 상당 부분이 손실되기 때문에 효율적인 에너지 전달 메커니즘을 갖는 플라즈마 소스가 있어야 하는데 앞에서 언급한 수십 MHz를 사용하는 이중 전극 시스템 또는 삼중 전극 시스템이 하나의 대안이 될 수 있다. 또 다른 대안으로는 유도결합형 플라즈마 소스가 있다. 가장 많이 사용되는 유도결합형 소스는 흔히 ICP Source라 불리며 평판형, 원통형 또는 돔형의 유전체에 코일을 감아 여기에 전류를 인가하고 코일 주변에서 발생하는 유도전기장을 이용하여 방전한다. 이와 유사한 장치로는 Helical Resonator, Helicon Plasma 등이 있으나 반도체 제조 공정에서는 거의 사용되지 않는다.

한편 현재 많이 사용되고 있는 고밀도 플라즈마 소스 중에서 고주파를 사용하는 이중 주파수 삼중 전극 방식과 유도 결합형 플라즈마는 어떠한 차별적

표 1. CCP와 ICP의 차이점 (Sugai, JJAP, 144, 1994).

	P (mTorr)	Ne (/cm ³)	KTe (eV)	Disso. fraction (%)	CF ₃	CF ₂	CF	CF+	F
CCP	100	10 ¹⁰	1~2	0.05	13	2	3	-	0.8
ICP	10	10 ¹¹	3~5	0.6	2.5	0.9	0.7	0.1	10

인 특성을 지니게 될까? 전자는 축전결합형 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma; CCP) 방식이고 후자는 유도결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma; ICP)방식인데 CCP와 ICP에서 주요 플라즈마 변수의 차이점은 표 1과 같다. 먼저 동작 압력에 큰 차이가 있다는 것을 알 수 있으며 플라즈마 밀도 또한 차이가 있다.

그리고 가장 큰 차이점은 전자의 온도라고 할 수 있다. 플라즈마 밀도는 이온의 밀도 및 에너지와 관련이 있기 때문에 식각율과 식각 형상 등과 관련이 있다. 전자의 온도는 훨씬 복잡한 역할을 하는데, 기체의 이온화, 해리 등과 관련이 있어서 물리적인 특성 뿐만 아니라 화학적인 특성에 많은 영향을 준다. 예를 들면 표 1에서와 같이 CF₄ 가스를 플라즈마 상태로 만드는 경우 CCP와 ICP의 경우 많은 차이점이 있는 것을 알 수 있다. 특히 CF_x 형태의 활성종들 사이의 비율에 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

Oxide 식각에서는 선택비를 확보하기 위해 벽에 폴리머(CxFy)로 구성된 보호막을 형성시키면서 바닥을 식각하게 되는데 이때 보호막을 어떻게 적절하게 제어하는가가 공정의 주요 성공요소가 된다. CF₄를 주가스로 하는 공정을 예로 든다면 F와 CF₂는 식각에 중요한 활성종이고 CF와 CF₃는 폴리머를 형성시키는데 중요한 역할을 하는 활성종이다. 표 1에서 보는 바와 같이 ICP와 CCP에서 F, CF, CF₂, CF₃의 비율은 상당히 다른 양상을 보이며 이것은 왜 미세구조의 Oxide 식각에서는 CCP를 이용한 장치들이 유리하며 Poly-Si나 Metal 식각에서는 ICP가 더 많이 채택되는지를 잘 보여주는 예라 할 수 있다.

위에서 기술한 바와 같이 CCP와 ICP는 플라즈마 특성 측면에서 많은 차이점이 있으며 이들이 공정에 미치는 영향은 절대적이다. 기존의 CCP 또는 ICP만으로는 새로운 공정들의 요구에 부응할 수 없는 경우

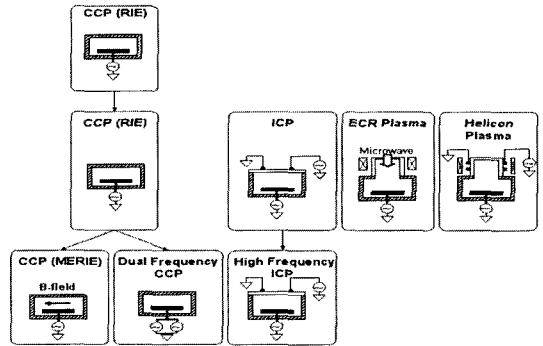


그림 3. 플라즈마 발생장치의 종류.

가 많으며 더 적합한 플라즈마 변수를 찾기 위해 수 많은 방법들이 시도되어 왔으며 지금도 많은 소스들이 시험되고 있다. Magnetic Enhanced ICP(MEICP), Low or High Frequency ICP, Multiple ICP, Helicon Plasma, ECR Plasma, Surface wave Plasma(SWP), Magnetically Enhanced RIE(MERIE), Dual Frequency RIE 등 많은 방법들이 개발되었으며 이들 중에는 현재 상용화에 성공되어 양산에 사용되고 있는 장비도 있지만 거의 사용되지 않는 방식들도 있다. 하지만 현재는 적합한 제조 공정이 없어서 사용되지 않더라도 소자 제조 기술이 발전하고 변천을 거듭하면서 미래에는 언젠가는 꼭 필요한 기술로 화려하게 부활할 기술들도 있을 것이라 생각된다.

2.2 증착 공정용 플라즈마 발생장치

증착 공정용 플라즈마 발생장치 역시 기본적으로 위에서 설명한 식각용 플라즈마 발생장치와 동일한 형태를 사용한다. 그러나, 증착 공정에서의 요구사항을 만족시키기 위해 RF 주파수나 플라즈마 발생장치의 형태가 식각공정용 플라즈마 발생장치와는 다르게 사용된다.

증착공정용 플라즈마 발생장치 중 가장 대표적인 것은 HDP CVD(High Density Plasma Chemical Vapor Deposition)용 플라즈마 발생장치이다.

HDP CVD 공정은 약 1 mTorr 안팎의 낮은 압력에서 이루어져야 하며 플라즈마 밀도는 아주 높아야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 플라즈마 소스는 ECR이 가장 적합하다고 할 수 있지만 ECR은 복잡한 장비구조와 대면적화에 불리한 문제가 있어서 지금은 주로 유도결합형 플라즈마 소스(ICP)를 사용한다. HDP CVD용 ICP에서는 주로 400 KHz나 2 MHz 정도의 비교적 낮은 주파수의 소스가 사용되는데 그 이유는 다음과 같다. ICP에서 플라즈마의 발생 효율은 전자-중성종 간의 충돌 주파수와 인가한 RF 주파수가 비슷할 때 커지게 된다. 그래서 낮은 압력의 경우 플라즈마 발생효율을 높이기 위해 낮은 주파수의 전력원이 사용된다. 또 하나의 이유는 고밀도 플라즈마를 만들기 위해 높은 전력을 인가해야 하는데 이때 안테나에 높은 전압이 가해지고 이는 구조물 간의 아크 발생 등의 하드웨어의 불안정을 초래한다. 만약 같은 전력이라도 주파수가 낮다면 안테나에 걸리는 전압이 낮아지게 되어 높은 전력을 인가하는 것이 쉬워지는 장점이 있다.

한편 하부 전극에도 RF 전압을 가하는데 여기에는 주로 13.56 MHz의 주파수가 사용되는데 이때 주파수는 이온의 에너지와 에너지 분포함수에 관여하므로 하부 바이어스 전력의 주파수 선택도 중요한

변수가 된다.

이와 같이 HDP CVD에서는 식각과 증착이 동시에 일어나며 상부 플라즈마 소스는 이온의 선속을 결정하고 하부 전극은 이온의 에너지를 결정하기 때문에 둘 사이의 역할의 조화가 무엇보다도 중요하다. 앞에서 설명한 저주파수의 상부 플라즈마 소스와 상대적으로 높은 주파수의 하부 바이어스 소스가 유일한 대안은 아니며 현재 여러가지 방식들이 개발되고 있다.

3. 결론

플라즈마 발생장치는 기체를 분해하여 매우 높은 반응성을 갖는 활성종, 또는 이온을 생성하는 장치로서 매우 높은 안정성과 내구성이 요구된다. 플라즈마라는 물질 상태 자체가 일반적인 환경에서는 매우 불안정한 상태이지만, 반도체 소자는 점점 더 작아지고, 더 높은 수준의 공정 제어 기술을 요구하므로 해당 공정을 위한 특성을 안정적으로 제공하는 플라즈마 발생장치가 매우 절실하다.

최근에는 기존의 매우 정적인 플라즈마 제어 기술에서 탈피하여, 가변주파수를 이용하거나, 플라즈마 특성을 측정하며 그 신호를 되먹임하는 제어기술이 적극적으로 도입되고 있으며, 앞으로도 해당 공정의 특성 구현의 안정성이 매우 중요해질 전망이다.

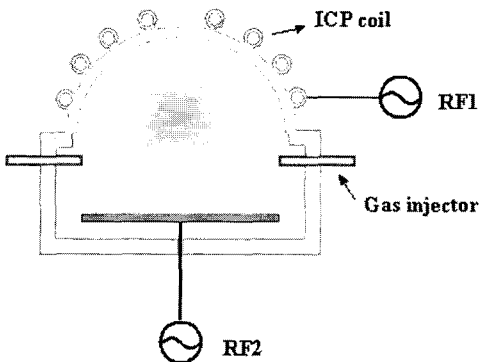


그림 4. HDPCVD 장치의 개념도.

저|자|약|력



성 명 : 이상원

◆ 학 력

- 1995년 한국과학기술원 물리학과 이학사
- 1997년 한국과학기술원 물리학과 이학석사
- 2005년 한국과학기술원 물리학과 이학박사

◆ 경 력

- 2003년 - 2004년 (주)플라즈마트 기술연구소 선임 연구원
- 2004년 - 현재 (주)플라즈마트 기술연구소 소장