

반도체 및 평판 디스플레이 산업에서의 진공 챔버 건식 세정을 위한 원격 플라즈마 생성 장치

이한용, 손정훈, 장보은, 임은석, 신영식, 문홍권

(주)뉴파워플라즈마, 경기도 평택시 서탄면 발안로 1198-7

Abstract

반도체에 대한 수요가 늘어남에 따라 반도체 칩 생산을 위한 웨이퍼 공정 및 평판 디스플레이 제조 공정에서 수백~수십 나노 단위 크기의 트랜지스터, 커패시터 등의 회로소자 제조를 요구하고 있다. 이에 따라 반도체 공정의 미세화가 10nm 이하까지 다다랐고 이로 인해 수율과 신뢰성 측면에서 파티클, 금속입자, 잔류이온 등 진공 챔버 내부의 오염원 제거 중요성이 점점 증가하고 있다. 이러한 오염원 제거를 위해서 과거에는 진공 챔버를 개방하여 액상물질로 주기적인 세정을 하였으나 2000년대 초반부터 생산성 향상을 위해 진공 상태에서 건식 세정하는 원격 플라즈마 발생장치(Remote Plasma Generator, RPG)를 개발하여 공정에 적용 해 왔다.

건식 세정을 위해서 화학적 반응성이 높은 고밀도의 라디칼이 필요하고 이를 위해 플라즈마를 이용하여 라디칼을 생성한다. RPG는 안테나 형태의 기존 유도 결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 방식에 자성 코어(Ferrite Core)를 추가함으로써 고밀도 플라즈마 생성이 가능하다. 본 세션에서는 이러한 건식세정과 관련된 플라즈마 기술 소개, 플라즈마 발생장치의 종류 및 효과적인 건식 세정을 위한 원격 플라즈마 발생장치를 소개하고자 한다.

1. Introduction

최근 반도체 기술의 발전에 힘입어 많은 분야에서 반도체를 이용하고 있다. 특히 컴퓨터, 스마트폰 등이 널리 보급됨에 따라 크기는 작아면서도 고성능의 반도체를 생산해내는 기술이 필요하다. 이에 발맞추어 반도체의 집적화를 높이기 위한 미세화 공정을 지속적으로 개발하고 있다. Fig. 1과 같이 해가 갈수록 반도체 공정의 최소 선폭이 줄어들고 있으며 최근에는 10nm 수준까지 이르렀다.

반도체를 생산하는 공정에서 발생하는 금속입자, 잔류이온 등의 불순물들이 소자의 수율과 신뢰성에 큰 영향을 준다. 특히 반도체 공정의 미세화가 진행됨에 따라 불순물이 주는 영향력이 더욱 커지고 있다. 따라서 실제 반도체를 깎는 공정 외에도 이러한 오염원을 제거하는 공정에 대한 관심이 날로 증가하고 있으며, 세정 공정 개선에 많은 노력을 기울이고 있다.



Fig. 1 반도체 공정의 미세화

과거에는 오염원을 제거하기 위해서 진공 챔버를 개방하여 액상물질로 주기적으로 세정하였으나, 2000년대 초반부터 생산성 향상을 위해 진공상태에서 건식 세정을 하는 방식을 적용하여 왔다. 건식 세정 방식은 화학적 반응성이 높은 F 원자를 불순물 입자와 반응시켜 기체로 만든 후 진공 펌프를 통해 밖으로 내보내는 방식이다. F 원자는 자연상에 존재하지 않기 때문에 별도의 과정을 통해 생성할 필요가 있다. 일반적으로는 CF_4, NF_3, SF_6 등의 가스에 플라즈마를 발생시켜 가스 분자가 깨지면서 나오는 F 원자를 활용하는 방법을 사용하고 있다. 따라서 고성능의 세정 효과를 나타내려면 많은 양의 F 원자를 만들어낼 필요가 있으며, 이를 위해서는 고밀도의 플라즈마가 필요하다.

반도체 공정의 발전에 있어서 플라즈마를 잘 이해하고 운용하는 것은 필수불가결한 사항이다. 본 지에서는 플라즈마의 원리에 대한 소개 및 이를 바탕으로 하는 공정장치에 대한 소개를 진행하고자 한다.

2. 플라즈마의 원리

2.1 플라즈마의 정의

‘플라즈마는 물질의 제 4의 상태’라고 최초로 명명한 사람은 영국의 물리학자인 Crookes이다. 일반적으로 물질은 고체, 액체, 기체의 3가지 상태로 존재하고 있다.

고체가 에너지를 받으면 액체가 되고, 액체가 에너지를 받으면 기체 상태로 변하게 된다. 플라즈마는 기체 상태의 물질이 에너지를 추가적으로 얻음으로 만들어진다.

이 물질의 상 변화는 물질을 구성하고 있는 분자들의 움직임으로 설명할 수 있다. 먼저 고체 상태에서는 분자가 다른 분자와 연계하여 일정한 모양을 형성한 상태로 유지하고 있다. 고체 물질이 에너지를 받으면 분자의 움직임이 비교적 자유로워지는 액체 상태로 변한다. 그리고 더 에너지를 가하게 되면 각 분자들은 분자 간 작용하는 인력을 끊고 자유롭게 움직이는 기체 상태가 된다. 여기에서 더 에너지를 주면 일부 기체 분자 중의 전자가 기체 분자와의 전기적 인력을 끊고 자유롭게 움직이는, 기체 분자의 이온화 현상이 일어난다. 따라서 기체분자 사이에 이온과 전자가 함께 있는 상태가 되는데, 이를 플라즈마 상태라고 정의한다.

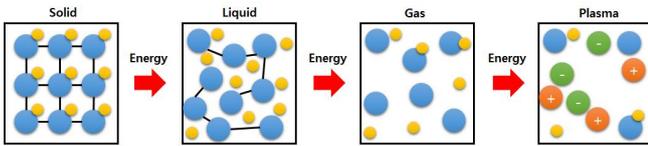


Fig. 2 물질의 상 변화 흐름도

원자핵과 전자가 존재하는 모든 물질을 플라즈마라고 하지는 않는다. 플라즈마를 정의하는데 있어서 중요한 키워드는 “준중성” 상태이다. 플라즈마는 기체 분자의 이온화를 통해 생성되기 때문에 이온과 전자의 수가 같게 유지된다. 따라서 외부의 거시적인 관점에서 봤을 때의 플라즈마는 중성 상태지만, 국부적으로는 이온과 전자간에 전기력이 존재하는 상태인데, 이를 준중성 상태라고 정의한다.

준중성 상태를 정의하는 플라즈마 지표로 “디바이 길이(Debye length)”가 있다. 준중성 상태의 플라즈마에 외부 전하가 들어가면, 전자의 빠른 이동을 통해서 이를 중성 상태로 되돌리고자 하는데, 이때 필요한 길이를 디바이 길이라고 정의를 하게 된다. 즉, 디바이 길이 외부에서는 전기적으로 중성이 유지가 되어 외부 자극에 영향을 받지 않게 된다.

준중성 상태를 유지하는 조건에 한해 플라즈마를 정의할 수 있다. 만약 외부 조건으로 인해 이 준중성 상태가 깨지면 플라즈마를 정의하기 어렵기 때문에 챔버를 설계하는데 있어 준중성 상태 유지를 위한 디바이 길이를 고려하는 것은 매우 중요하다.

2.2 플라즈마의 생성 원리

기본적으로 플라즈마를 만들기 위해서는 입자와 전자를 분리시키는 과정이 필요하다. 플라즈마를 만드는 방법은 대략 3가지 정도가 있는데, 열을 가하는 방법, 전기장을 가하는 방법, 전자를 충돌시켜 분리하는 방법 등이 있다. 이 중 3번째인 전자를 충돌시켜 원자핵과 전자를 분리시키는 방법이 적은 에너지로 플라즈마를 발생시킬 수 있어 많이 사용하고 있다.

전기장을 사용하면 전자를 비교적 쉽게 가속시킬 수 있다. 전자에 전기장을 가하면 $F = qE$ 의 식에 따라 전기장 방향으로 전자가 힘을 받아 가속을 하게 된다. 가속을 통해 충분한 운동에너지를 얻은 전자는 기체 분자 또는 원자와 충돌하여 이온화 반응을 일으켜 기체 분자로부터 전자를 분리한다.

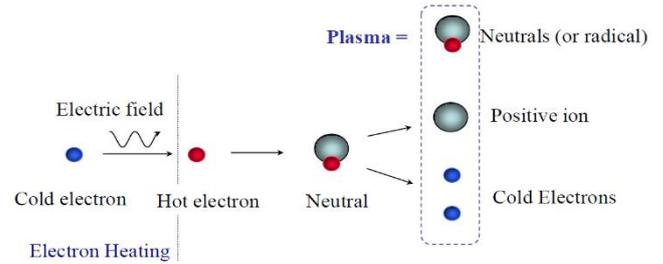


Fig. 3 전자 가속을 통한 플라즈마 생성 원리

이 과정을 통해 기존 전자 및 새롭게 생성된 전자가 다시 전기장으로 가속되어 다른 기체 분자를 이온화시키는 과정을 반복한다. 이렇게 되면 전자의 수는 지수함수적으로 급격하게 증가하게 되는 ‘전자사태 (electron avalanche)’를 일으키게 되어 플라즈마를 형성한다.

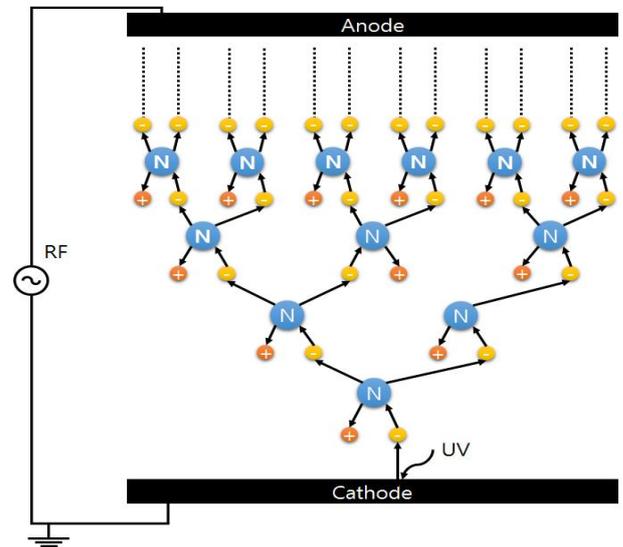


Fig. 4 초기 플라즈마 방전을 일으키는 전자사태

3. 플라즈마 발생 장치 및 해석

3.1 플라즈마 발생장치

2.2절에서 설명한 바와 같이, 플라즈마를 만들기 위해서는 전자를 가속시킬 수 있는 전기장을 형성해야 한다. 이 전기장을 형성하는 방법은 크게 2가지 방법이 있다.

첫 번째는 축전 결합 방식으로, 전극 사이의 전위차를 이용한 방식이다. 분리되어있는 두 전극 사이에 발생하는 전위차는 $E = V/d$ 의 식에 따라 전기장을 만들어내고, 이 전기장을 통해 전자를 가속시키게 된다. 이 방식은 장치 구성이 비교적 간단하여 값싸게 제작이 가능하며, 플라즈마가 균일하게 분포한다는 장점이 있다.

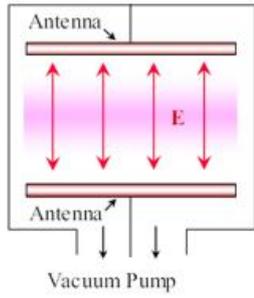


Fig. 5 축전 결합 플라즈마 발생장치 [1]

축전 결합 방식을 이용하는 대표적인 반도체 공정은 식각 공정이다. 식각 공정은 Fig. 6과 같이 증착된 물질을 원하는 형태로 깎아 내는 공정(식각 공정)이다.



Fig. 6 식각 공정 모식도

물질을 깎아내기 위해서 질량이 큰 이온에 에너지를 가하여 목표 물질에 충돌시키는 방식을 사용한다. 식각 공정을 하기 위해서는 충분한 이온에너지가 필요한데, 축전 결합 방식에서는 플라즈마의 쉬스(sheath)를 이용한 이온 가속을 통해 식각을 위한 이온에너지를 얻을 수 있다. 하지만 축전 결합 방식의 방전에서는 이온 에너지와 이온 흐름을 독립적으로 제어할 수 없다는 문제점이 있다. 이로 인해 이온 에너지를 높이면 원하지 않는 방향으로 이온 흐름이 발생하여 장치에 많은 손상을 주게 되고, 이온 흐름을 제어하려고 하면 충분한 이온 에너지를 만들 수 없다는 약점이 존재한다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 현재에는 Fig. 7과 같이 여러 대역의 주파수를 동시에 이용하여 이온 흐름과 이온 에너지를 개별적으로 제어하는 시도를 진행한다. 높은 주파수의 소스는 플라즈마 밀도와 이온 흐름을 제어하고, 낮은 주파수의 소스는 이온에너지를 제어하는데 사용한다.

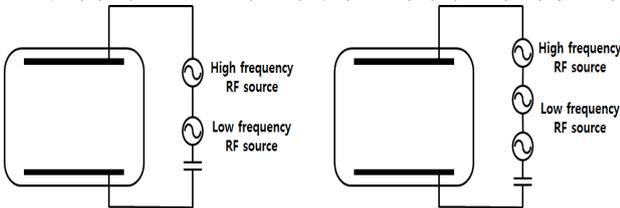


Fig. 7 다중 주파수를 사용하는 축전 결합 방식

두 번째는 유도 결합 방식으로, 유도전기장을 이용한 방식이다. 챔버 주변에 도선을 감아주고 교류 전류를 흘려주게 되면, 암페어 법칙에 따라 전류가 흐르는 도선 주위에 자기장을 형성한다. 그러면 렌츠의 법칙(Lenz's Law)에 따라 발생하는 자기장을 막기 위한 방향으로 유도 자기장이 형성되고, 패러데이 법칙(Faraday's Law)으로 유도 자기장이 유도 전기장을 형성하여 전자를 가속한다.

교류 전류를 넣어주게 되면 전류의 방향이 지속적으로 바뀌기 때문에 유도전기장을 지속적으로 만들 수 있다. 유도 결합 플라즈마는 도선의 위치에 따라 평면형 방식과 원통형 방식으로 나뉜다.

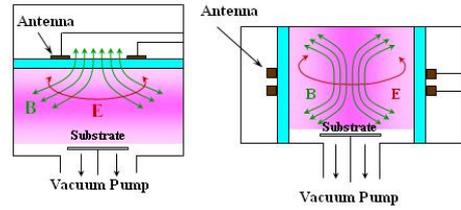


Fig. 8 유도 결합 플라즈마 발생장치. 좌 - 평면형, 우 - 원통형[1]

이 방식은 플라즈마 가둠 성능이 뛰어나기 때문에 고밀도의 플라즈마를 생성할 수 있으며, 플라즈마에 의한 장비 손상이 적기 때문에 넓은 범위의 압력과 주파수에서 작동이 가능하다.

유도 결합 방식을 사용하는 대표적인 장치는 건식 세정용 가스 분해 장치이며, 당 사에서도 이 방식을 이용한 세정 장치를 개발하였다. 이와 관련된 내용은 4장에서 상세히 설명한다.

3.2 플라즈마 해석을 위한 유도 결합 플라즈마 등가 회로 이론

플라즈마를 이용한 공정을 진행함에 있어, 원하는 결과를 얻기 위해서는 플라즈마의 특성을 잘 이해할 필요가 있다. 플라즈마의 특징을 파악하기 위한 가장 직접적인 방법은 플라즈마 내부에 탐침(probe)을 투입하여 그 신호를 받아 해석하는 방법이다. 대표적인 장치로는 랭뮤어 탐침(Langmuir Probe)이 있는데, 금속 탐침을 투입하여 측정된 플라즈마 전위와 전류를 이용하여 플라즈마의 여러 특성들을 분석할 수 있다. 하지만 탐침을 이용한 해석은 탐침 자체가 기존 플라즈마에 왜곡을 주기 때문에 사용 조건이 제한될 뿐만 아니라, 데이터 해석을 하기 위해 많은 정보와 경험이 필요하기 때문에 현실적으로 사용하기에는 어려운 측면이 있다.

따라서 차선책으로 플라즈마 구성요소를 회로 구성요소로 생각하여 등가회로를 구성한 후, 전체적인 회로의 임피던스를 측정하는 방식을 생각할 수 있다. 이 분석법을 이용하면 전압, 전류, 임피던스 등 전기회로적인 결과만 가지고도 플라즈마의 특성을 이해할 수 있다는 장점이 있다.

유도 결합 플라즈마의 등가회로는 변압기 모형으로 설명할 수 있다. 이에 대해서는 Picjak[2]과 Lieberman[3]이 해석을 진행한 바가 있다. 주어진 챔버를 원통형 챔버라고 가정하면 챔버는 N번 감은 1차측 코일, 플라즈마는 1번 감은 2차측 코일로 표현할 수 있다. 이 때 플라즈마의 인덕턴스는 코일이 감긴 기하학적 형상에 따른 인덕턴스와 전자관성을 고려한 인덕턴스 2가지로 나누어 구성된다. 변압기 모형을 통해 1차측 회로와 2차측 회로를 구성한 후, 전자기 법칙들을 이용하여 이 회로를 단일 회로로 변환하여 분석할 수 있다.

Picjak은 회로의 관점에서 해석을 진행하였다. 1차측과 2차측 각각에 키르히호프 법칙(Kirchhoff's Law)을 적용한 후 연립방정식을 풀면 2개의 회로를 1개의 직렬 회로로 병합할 수 있다. 미지수는 플라즈마 저항 R_2 , 플라즈마 인덕턴스 L_2 , 결합계수 k 의 3가지이며, 이는 다음 3개의

식을 연립하여 구할 수 있다.

$$R_1 = R_0 + R_2 \frac{w^2}{Z_2^2} k^2 L_0 L_2$$

$$L_1 = L_0 - w k^2 L_0 L_2 [w L_2 + \left(\frac{w}{v}\right) R_2] / Z_2^2$$

$$L_2 = L_0 \frac{1}{n^2 k}$$

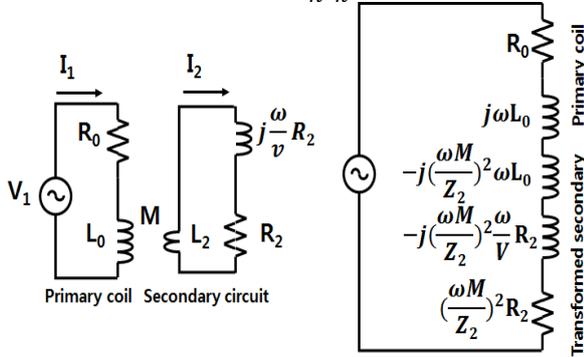


Fig. 9 유도 결합 방식 플라즈마의 등가 회로도 (Picjak) [2]

Lieberman은 합쳐진 단일 회로를 주어진 모형의 기하학적 형태, 플라즈마의 성능 등 실제적인 수치로 표현하였다. 코일의 자기유도, 코일간의 상호유도 및 이에 따른 유도 기전력 등을 반영하여 단일 회로로 표현 가능하다. 단일 회로의 임피던스를 $Z_s = R_s + j\omega L_s$ 라고 하면 R_s 와 L_s 는 다음과 같이 나타난다.

$$R_s = N^2 \frac{\pi R}{\sigma_{dc} l \delta_p}$$

$$L_s = \frac{\mu_0 \pi R^2 N^2}{l} \left(\frac{b^2}{R^2} - 1 \right)$$

여기에서 σ_{dc} 는 플라즈마 전도도, δ_p 는 플라즈마 표면 깊이(Skin depth)로써 플라즈마의 성능에 영향을 받는 요인이며, 그 외의 다른 요소들은 모두 플라즈마 발생장치의 기하학적인 요소로 나타난다.

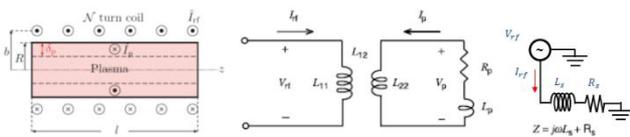


Fig. 10 유도 결합 방식 플라즈마의 등가 회로도 (Lieberman) [3]

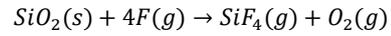
4. 강자성 강화 유도 결합 플라즈마를 이용한 원격 세정 장치

4.1 원격 세정 방식

반도체 증착 공정을 진행하면 증착에 따른 잔여물들이 발생한다. 주로 규소(Silicon) 화합물로 이루어진 이 잔여물들은 챔버 곳곳에 박막(Thin film) 상태로 존재하여 불순물로 작용하며, 이로 인해 챔버의 성능을 저하시키고 심하게는 챔버에 물리적, 전기적인 손상을 주는 원인이 된다. 따라서 이러한 불순물들을 제거해주는 세정 공정이 필요하다.

일반적으로는 플루오르(F) 라디칼을 규소 화합물과 반응시켜 기체로 만든 후 진공펌프를 통해 외부로

빠져나가도록 하는 방법을 사용한다. 반도체 증착 공정에 주로 사용하는 물질 가운데 규소(Si)와 이산화규소(SiO₂) 두 가지가 있다. 이 물질은 플루오르 원자와 반응을 통해 기체로 만들 수 있다.



세정 방식은 크게 직접 세정 방식과 원격 세정 방식으로 나뉘게 된다. 직접 세정 방식은 챔버 내에 플라즈마를 발생시켜서 반응물과 곧바로 반응을 일으키는 방식이며, 원격 세정 방식은 별도의 지점에서 플라즈마를 발생시킨 후 챔버로 이동시켜 화학반응을 일으키도록 하는 방식이다. 직접 세정 방식은 챔버 내부에서 플라즈마를 발생시키기 때문에 생성된 F 원자가 곧바로 반응을 일으킬 수 있다는 장점은 있지만, 챔버 용량 및 내부에서 가속된 이온이 챔버 혹은 기타 부속품을 손상시킬 염려가 있어 일정 수준 이상의 플라즈마를 만들기 어렵다. 원격 세정 방식은 플라즈마 발생 지점과 실제 화학 반응을 일으키는 지점이 떨어져 있기 때문에 챔버에 주는 손상이 비교적 적고 고밀도의 플라즈마를 생성할 수 있지만, 만들어진 F 원자가 챔버까지 이동하는 과정에서 원자 재결합 등을 통해 F 원자가 손실될 우려가 있다.

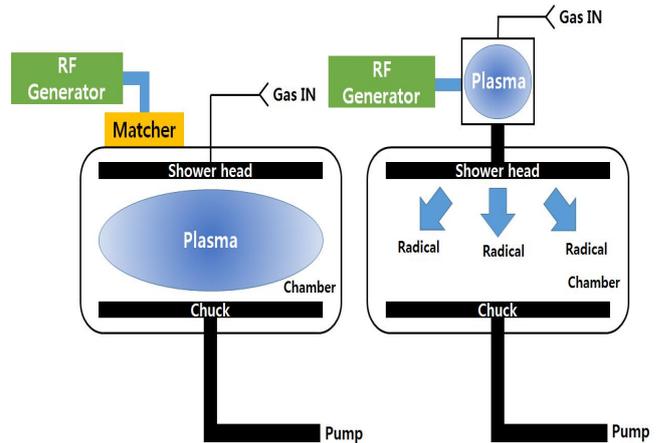


Fig. 11 좌 - 직접 세정 방식, 우 - 원격 세정 방식

4.2 강자성 강화 유도 결합 플라즈마

원격 플라즈마 세정 장치에서 세정 성능을 결정짓는 요소는 얼마나 많은 F 원자를 발생시키는가에 있다. 그리고 많은 F 원자를 발생시키기 위해서는 기존 가스를 분해 할 수 있는 전자를 많이 형성하는 것, 즉 플라즈마의 밀도를 높일 필요가 있다. 3.1절에서 언급한 바와 같이, 높은 플라즈마 밀도를 가지기 위해서는 유도 결합 형태의 플라즈마를 이용하는 것이 효과적이다.

하지만 유도 결합 플라즈마의 경우에도 입력 전력 대비 손실이 존재한다. 유도 결합 플라즈마는 자기력선의 결합 효과를 통해 플라즈마로 에너지를 전달하는데, 일반적인 유도 결합 플라즈마에서는 대기 중으로의 자기장 누설로 인한 손실이 존재한다. 이 누설되는 자기장을 효과적으로 집약할 수 있는 방법으로 강자성 코어를 사용하는 방법이 있다. 강자성 코어는 투자율(Permeability)이 높고 자기장이 코어 내부에 집중되는 효과가 있으며, 이에 따라 누설되는

자기장을 줄여서 결합상수를 최대로 높일 수 있다. [4]

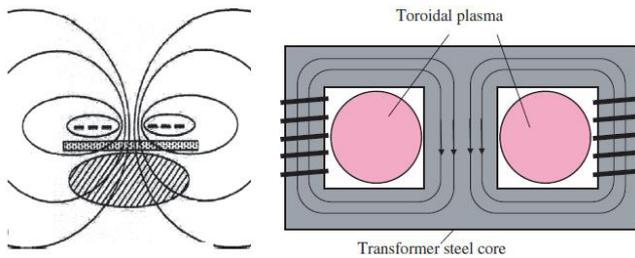


Fig. 12 좌 - 일반적인 유도 결합 장치의 자기력선, 우 - 강자성

코어를 이용한 유도 결합 플라즈마의 자기력선 [4]

4.3 (주)뉴파워플라즈마의 세정장치 개발

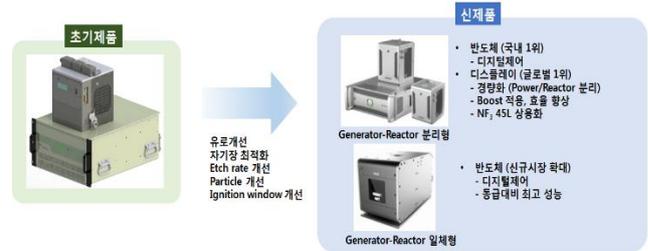
당 사는 2002년 국내 최초로 반도체 및 디스플레이 공정에 필요한 세정장치를 개발하여 국내와 해외에 공급하고 있다. 플라즈마 발생방식은 4.1절과 4.2절에서 언급하였던 강자성 강화 유도 결합을 적용하여 효율적으로 고밀도 플라즈마 발생이 가능하다.

당 사의 원격 플라즈마 세정장치는 개발 초기 시장에서 요구하는 제품 사용의 편의성 및 고장 시 제품 교체시간을 줄일 수 있는 경량화에 초점을 맞추어 제품을 개발하였다. 반도체 분야에는 세정가스 사용량이 상대적으로 적어 제품의 체적이 크지 않은 반면 디스플레이공정에서는 패널의 크기가 매우 커져 그에 따른 플라즈마 챔버 체적도 커지기 때문에 원격 세정기의 크기도 증가하였다. 디스플레이용 세정기의 경우 총 100kg이 넘으며 생산현장에서의 제품 설치, 취급이 어려워 경량화의 목소리가 컸다. 이에 당 사에서는 전력 공급부와 플라즈마 발생 부를 분리하여 개발을 진행하였다. 분리형 제품은 전력전달 전송라인이 길어 임피던스 매칭이 상대적으로 어려운 단점을 극복하고 시장에서 호평을 받으며 현재까지 디스플레이분야에서 글로벌 시장 점유율 1위를 차지하고 있다.

분리형 제품 군은 최대 45SLM 가스유량 조건에서도 플라즈마를 안정적으로 유지할 수 있으며 그에 따른 파워공급 효율 높이기 위해서 부스트(Boost)회로를 적용하였다.

반도체분야에서 많이 사용되는 일체형 제품의 경우도 기술개발을 거듭해서 고밀도 플라즈마생성에 유리한 정전류 공급방식 및 디지털제어 방식 기술을 접목하여 안정성이 높고 효율적으로 플라즈마를 발생 시킬 수 있다.

이러한 기술력을 인정받아 현재 당 사의 제품은 글로벌 장비제조사 제품에 탑재되어 한국 내 반도체, 디스플레이 제조사뿐만 아니라 대만, 중국 등 해외의 반도체, 디스플레이 제조 회사에 납품하고 있다. 최근에는 시장에서의 생산제조원가를 낮추기 위한 세정가스 사용량 저감, 전력효율 향상, 환경안전과 관련된 방사 노이즈 저감 등 높아져 가는 시장 요구 사항을 만족시키기 위해 플라즈마 최적화 연구를 통한 가스 사용량 감축 등 지속적인 연구 개발을 진행하고 있다.



5. 결론

반도체 및 디스플레이 산업의 발전에 따라 공정 수율 및 생산성 향상을 위해서 장비 내부 공정 부산물 제거의 중요성이 높아지고 있다. 특히, 진공상태에서 장비의 가동중지 시간을 최소화하기 위해서는 플라즈마를 이용한 원격 세정장치의 사용이 필수적이다. 본 지에서는 이러한 관점에서 세정 공정의 화학반응, 활성종 생성을 위한 플라즈마의 기본 이론과 회로적 관점에서의 해석, 그리고 기존 유도 결합 플라즈마를 발전시킨 강자성 강화 유도 결합을 활용한 원격 플라즈마 발생장치에 대해 소개하였다.

당 사에서는 강자성 강화 유도 결합 플라즈마와 원격 세정 방식을 접목한 원격 플라즈마 발생장치(Remote Plasma Generator, RPG)를 개발하여 납품하고 있으며, 나날이 높아져가는 반도체 장비의 요구수준을 만족하기 위해 지속적으로 플라즈마와 회로에 대한 연구를 진행하고 있다.

Reference

- [1] 플라즈마 물성정보시스템 plasma.kisti.re.kr
- [2] R.B. Piejak et al., "A simple analysis of an inductive RF discharge", Plasma Sources Science and Technology, Vol. 1, No. 3, pp. 179-186, 1992
- [3] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenburg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing" 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., 2005
- [4] V. Godyak, "Ferromagnetic enhanced inductive plasma sources", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 46, No. 28, 283001, 2013

* 주저자 : (주)뉴파워플라즈마 플라즈마 연구소 팀장

Tel : 031-612-7650 e-mail : hylee@newpower.co.kr