

RF 플라즈마 전력 전송 기술

이상원(인투코어 테크놀로지(주) 기술혁신팀)

1. 서 론

플라즈마를 이용한 반도체 또는 디스플레이 공정에서는, 하전입자에 에너지를 공급하기 위해 전원 장치를 필수적으로 사용한다. 플라즈마 발생 방식에 따라 사용하는 전원 장치의 사양이 조금씩 달라지는데, ICP의 경우 교류형태의 전원장치가 필요하며, 대부분 수백 kHz에서 수십 MHz 이내의 고주파 전원장치가 널리 사용되고 있다.^[1]

이러한 고주파 전원장치들을 이용하여 플라즈마 발생 장치에 전력을 공급하기 위해서는 전원발생을 담당하는 RF 전원 공급 장치(rf generator)와 발생된 전력을 부하에 효과적으로 전달하기 위한 임피던스 정합기(impedance matching network)이 필수적으로 사용되며, 특히 임피던스 정합기는 공정 조건에 따라 변화하는 플라즈마의 임피던스에 따라 최적의 전력 전달을 위해 지속적으로 제어되는 장치로서 사용하는 공정 장비의 전기적 특성에 맞게 제작된다.

이 논문에서는 고주파 전원을 사용하는 플라즈마 장치에 필요한 구성요소와 작동원리, 그리고 ICP 장치에서 고려되어야 할 내용들을 소개한다.

2. 임피던스(Impedance)

고주파 전원 장치들에 대해 설명을 위해서 먼저 임피던스에 대한 이해가 필요하다.

임피던스는 전압과 전류의 상관관계를 규정짓는 양이며, 다음과 같이 전류에 대한 전압의 비율로서 정의 된다.

$$Z = \frac{V}{I} \quad \text{[수식 1]}$$

DC 전원을 이용하는 경우에는 저항이 임피던스가 되며, 이 경우도 저항 값을 알고 있으면 전류 또는 전압 중 어느 하나를 알 경우 다른 값을 구할 수 있다.

DC가 아닌 교류 전원에서는 일반적으로 전압과 전류가 동일한 위상을 갖지 않고 부하의 전기적 특성에 따라 전류-전압의 상대 위상이 틀어진다. 따라서 전류와 전압의 관계를 정의할 때 진폭의 크기 비율뿐만 아니라 상대 위상을 기술 할 방법이 필요하다.

이를 위해 임피던스를 표시 할 때는 복소수를 사용하며 [수식 2]와 같이 표기한다.^[2]

$$Z = \frac{V}{I} = R + iX = |Z|(\cos\theta + i\sin\theta) \quad \text{[수식 2]}$$

위 수식에서 실수성분 R을 실저항(resistance)이라 부르고 허수성분 X는 허수저항(reactance)이라 부른다. 실저항은 공급된 전력을 소모하는 양으로서, 플라즈마 입장에서는 전력을 흡수하는 양과 관련되어 있다. 허수저항은 전력 소모와는 무관한 양이며, 공급된 에너지를 저장하는 역할을 한다.

전압과 전류의 상대위상은 부하에 연결되어 있는 소

자의 특성에 의해 결정되며, 저항이 연결된 경우에는 같은 위상을 갖지만 ICP 안테나 또는 코일과 같이 inductance 성분이 있을 경우에는 전압이 전류에 선행하며, CCP 전극 또는 capacitor가 연결된 경우에는 전류가 선행하여 음의 위상을 갖는다.

대표적인 소자들인 저항, inductor, capacitor들 중에서 저항의 경우 주파수에 따른 변화가 없지만 inductor와 capacitor는 주파수 의존성을 갖는다.

$$Z_L = i\omega L \quad [\text{수식 3}]$$

$$Z_C = -i \frac{1}{\omega C}$$

위 수식에서 $\omega = 2\pi f$ 이며, f 는 주파수이다. 식에서 볼 수 있듯이, inductor는 주파수에 비례하여 절대값이 커지므로 주파수가 낮을 때는 임피던스가 낮아 전류가 잘 흐르지만, 주파수가 높을 경우 전류가 잘 흐르지 못하는 성질을 갖는다. 이에 반해 capacitor는 허수저항의 절대값이 주파수에 반비례하는 특성을 갖고 있으므로 주파수가 낮을 때는 전류가 흐르지 못하고, 주파수가 높아야 전류가 잘 흐르는 특성을 갖는다. 이 특성을 이용하여 주파수별로 전류/전압의 특성을 제어할 수 있으며 고주파회로에서는 이를 필터라 부른다.

임피던스를 그래프로 표시할 때는 직교좌표를 이용하여 x축은 실저항, y축은 허수저항을 표시할 수 있다. 직교좌표는 직관적이고 보편적으로 사용되는 방식이지만 임피던스의 변화가 클 경우 표시하기 어려운 문제가 있다. 고주파 공학에서는 직교좌표보다는 Smith chart라는 표시 방식을 널리 사용하고 있으며, 다음과 같은 반사계수를 정의하고 이 값을 그래프로 표시한다.

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad [\text{수식 4}]$$

수식 4를 그래프로 표시할 경우, 직교좌표에서 $R=0$ 인 선은 Smith chart상에 최 외곽 원으로 변환되고 $X=0$ (허수저항 = 0)인 x축은 Smith chart의 중심을 수평으로 가로 지르는 직선으로 변환된다.

또한 동일한 실저항을 갖는 선, 즉 직교좌표에서 R 이 일정한 선들은 Smith chart에서 constant resistance circle

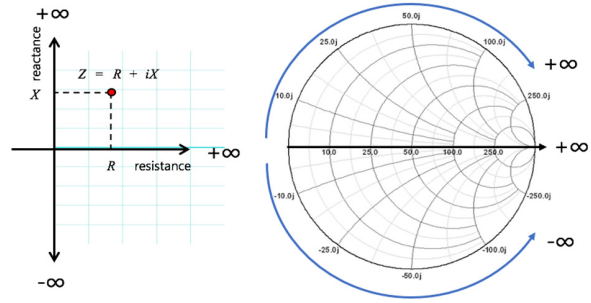


그림 1. 임피던스를 표시하기 위한 직교좌표와 이를 변환한 Smith chart

로 표현되며, 직교좌표에서 X =일정한 선들은 Smith chart에서 constant reactance circle로 변환된다.^[2]

Smith chart를 이용할 경우, 공진회로와 같이 임피던스의 변화가 큰 경우에도 하나의 그래프에 표시할 수 있으며, Smith chart의 중심점으로부터 떨어진 거리의 제곱이 입력전력에 대한 반사전력의 비율이 되므로 고주파 특성을 파악하는데 유용하다.

3. 임피던스 정합기 (Impedance matching network)

고주파 전원 시스템에서는 대부분 모든 부하에 50Ω이 연결되어 있다고 전제된다. DC 전원 시스템의 경우, 주파수가 0이기 때문에 허수저항의 중요성이 고주파 시스템에 비해 비중이 적지만, 고주파 시스템에서는 주파수가 0이 아니기 때문에 허수저항이 존재하고 주파수나 소자들에 따라 서로 다른 허수저항을 고려하여 전원 시스템을 설계하기 어렵다. 이에 따라 대부분의 고주파 부품들은 50Ω의 부하를 가정하고 제작되며 플라즈마 공정장비에 사용되는 전원 시스템 역시 동일하다.

하지만, 연결하고자 하는 모든 부하의 임피던스가 50Ω을 형성하고 있지 않기 때문에 부하 임피던스를 50Ω으로 변환하기 위한 장치가 필요하며, 이를 임피던스 정합기라 부른다.

플라즈마 공정장비 역시 같은 이유로 임피던스 정합기가 필요하다. 발생장치의 방식이나 공정 조건에 따라 서로 다른 특성의 플라즈마가 발생되고, 이에 따라 서로 다른 임피던스를 갖는다. 따라서 50Ω에 맞게 설계된 전원 공급 장치를 이용해 전력을 공급하기 위해서 전원 공급

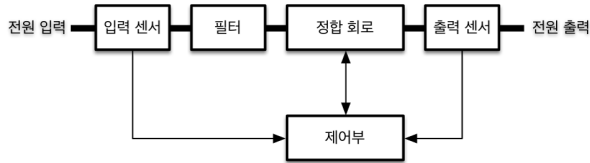


그림 2. 임피던스 정합기의 구조

장치와 플라즈마 발생장치 사이에 정합기를 설치한다.

플라즈마 공정장비에 사용하는 일반적인 임피던스 정합기의 구조는 그림 2와 같다.

플라즈마 공정에 사용되는 임피던스 정합기는 크게 입력 센서, 정합회로, 제어부로 이루어지며 공정장비의 요구사항에 따라 입력 센서와 정합회로 사이에 필터가 장착되거나 정합회로 출력 쪽에 전류/전압/위상을 측정할 수 있는 출력 센서가 장착되기도 한다.

고주파 전원장치에서 전력이 전달되면 입력 센서에서는 정합회로와 플라즈마 공정장치를 모두 포함하는 전체 임피던스를 측정하고, 제어부를 통해 정합회로에 배치된 가변소자를 조절하여 전체 임피던스가 50Ω 이 되도록 조절한다.

3.1. 입력 센서 및 제어부

입력 센서는 크게 임피던스의 위상과 크기를 측정하는 phase/mag 센서, 또는 전류/전압/위상을 측정한 뒤 프로세서를 이용해 임피던스를 계산하는 IV 센서가 사용되며 최근에는 IV 센서가 주로 사용되는 추세이다.

최근에는 펄스 플라즈마의 공정적용 및 짧은 공정 스텝에 대응하기 위해 빠른 응답속력 및 50Ω 이 아닌 부하에서의 정확도가 요구되고 있다. 펄스 플라즈마의 경우, 짧은 시간동안 전원의 투입과 차단이 반복되거나 이중 레벨 펄스(bi-level pulse 또는 high-low pulse)와 같이 완전히 차단되지 않고 고전력-저전력이 반복되는 펄스 사례도 있다. 이렇게 빠르게 전력 투입이 변화하는 상황에서는 각 전원 투입 단계가 매우 짧기 때문에 센서의 응답 특성이 빨라야 정밀한 임피던스 계산이 가능하다.

또한 공정 스텝이 매우 다양해짐에 따라, 짧은 단위 공정 스텝들에 대해 매우 빠르고 일관적인 정합특성이 요구되고 있다. 단위 공정 스텝이 매우 짧을 경우, 정합속력이 느리고 일관적이지 않으면 정합에 걸리는 시간의 편차로 인해 공정 결과에 영향이 크게 미치기 때문이다.

이를 위해 50Ω 뿐만 아니라 정합되지 않은 임피던스에서도 높은 정확도가 요구된다.

주파수 선택도 역시 중요한 요구사항이다. 최근 증가하는 이중 주파수 적용 장비의 경우, 입력 센서 쪽으로 다른 주파수 성분의 신호가 유입될 수 있는데, 이러한 신호로 인해 임피던스 측정이 부정확해지면 50Ω 에서 벗어난 임피던스로 정합을 하거나, 정합 특성의 편차가 커질 수 있다. 따라서 이중 주파수 적용 장비의 경우 원하는 주파수만 선택적으로 측정할 수 있는 센서 구성이 필수적이다.

3.2. 정합 회로

정합회로는 구성하는 방법에 따라 다양한 형태가 존재하며 다음 네 가지 형태가 널리 사용된다.

(1) Standard L type

13.56MHz 주파수를 이용하는 공정장비에 널리 사용되는 방식으로서 standard L type이라 부른다. 이 방식은 실저항이 50Ω 보다 큰 경우에는 사용이 불가능하며 이론적으로는 실저항이 50Ω 보다 작기만 하면 허수저항 값에 상관없이 정합회로를 구성할 수 있지만, 대부분의 경우 기생용량, 정합안정성, 판매되는 가변소자 모델의 한계로 인해 허수저항의 절대값이 $100\sim 200\Omega$ 이하인 경우에 널리 사용된다.

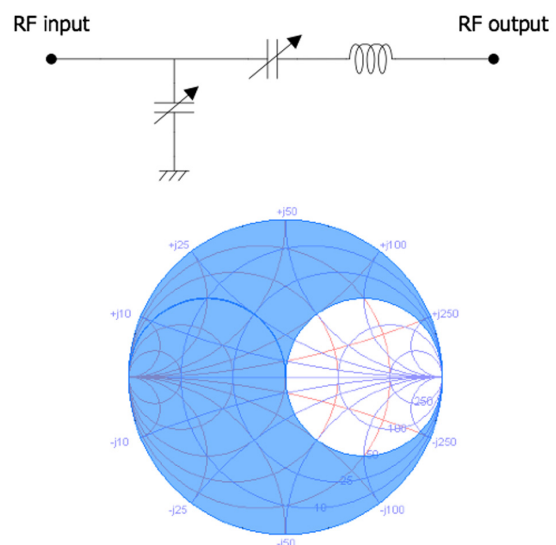


그림 3. Standard L type의 회로 구성과 정합 가능한 이론적 최대 영역

(2) Inverted L type

Inverted L type 또는 alternative L type으로도 불리며 standard L type과 비교했을 때 직렬소자와 병렬소자의 위치가 바뀐 형태이다.

이 방식 역시 실저항이 50Ω보다 작은 경우에만 사용이 가능하며, 동일한 부하를 이용하여 50Ω으로 변환했을 때, 더 작은 용량의 capacitor를 사용할 수 있다. 플라즈마 공정장비에서 사용하는 주파수가 낮은 경우, 일반적으로 큰 capacitance를 갖는 소자가 필요한데 capacitance가 큰 가변 capacitor는 전압/전류 사양이 낮은 경우가 많고, 제품의 종류도 다양하지 않다. 이 경우에 inverted L type의 회로를 이용하면 상대적으로 낮은 capacitance의 가변 capacitor를 장착할 수 있으며, 이러한 capacitor들은 제품이 다양하고 전압/전류 사양이 높은 제품들이 많기 때문에 정합회로 구성이 용이하다.

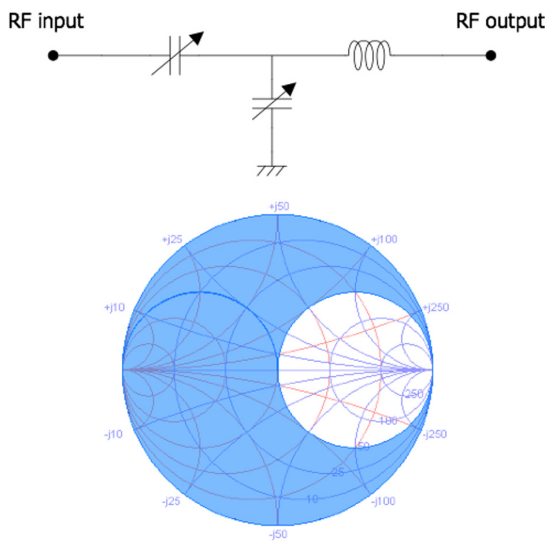


그림 4. Inverted L type의 회로 구성과 정합 가능한 이론적 최대 영역. 이론적 정합 영역은 standard L type과 동일

(3) T type

회로구성이 직렬-병렬-직렬로 이루어져 있으며 그 형태로 인해 T-type으로 불린다. 일반적으로 직렬 소자에 가변소자를 배치한다. T-type은 실저항이 50Ω보다 큰 경우에도 매칭이 가능하지만, 실저항이 매우 낮고 허수저항이 0 근처인 경우에도 많이 사용된다. 대표적으로 디스플레이 공정장비의 경우, 전극 면적이 매우 넓고 고출력 전원을 공급하기 때문에 실저항이 낮게 형성되는

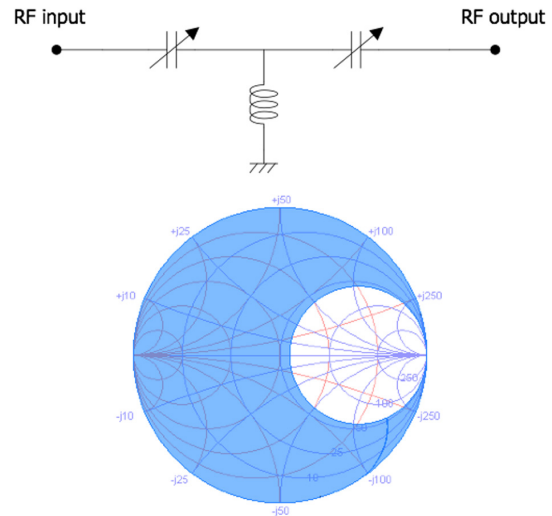


그림 5 T type의 회로 구성과 정합 가능한 영역. 소자 구성에 따라 표시된 영역보다 더 넓은 영역을 포함할 수 있다.

데, 이 경우에 L type을 사용하면 두개의 가변소자에 모두 높은 전류가 흐르게 된다. 하지만 T-type의 경우 출력의 가변 소자는 고전압/고전류에 노출되지만, 입력 측 가변소자는 낮은 전류가 흐르기 때문에 정합회로가 배치되는 공간을 줄이고 경제적인 이점이 있다.

(4) Pi type

병렬-직렬-병렬로 이루어져 있어서 Pi-type으로 불리며, T-type과 마찬가지로 실저항이 50Ω보다 큰 경우에도 사용이 가능하다. 널리 사용되는 13.56MHz 시스템에서는 플라즈마 공정장비의 실저항이 50Ω 이하로 형성되나 수백 kHz를 사용하거나 13.56MHz 사용하더라도 특수한 상황에서는 50Ω 이상의 실저항이 형성되기도 한다. Pi type은 50Ω보다 큰 실저항을 갖는 부하에 적용하기 적합하다.

Pi-type을 이중 주파수(dual frequency) 정합기의 저주파 회로로 적용할 때는 주의가 필요하다. 이중 주파수 장비에서는 저주파와 고주파 정합회로 각각의 출력이 서로 연결되어 최종 출력부로 향하는데, 저주파 정합회로의 출력 단에 capacitor가 장착되어 있으면 고주파 입장에서 매우 낮은 임피던스를 겪게 된다. 플라즈마 공정장비의 임피던스보다 이 임피던스가 매우 낮을 경우, Pi-type 회로의 출력 단 capacitor에 매우 큰 고주파 전류가 흐를 수 있으며 이 때문에 capacitor가 과열되어 손상될 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 적절한 필터 회로

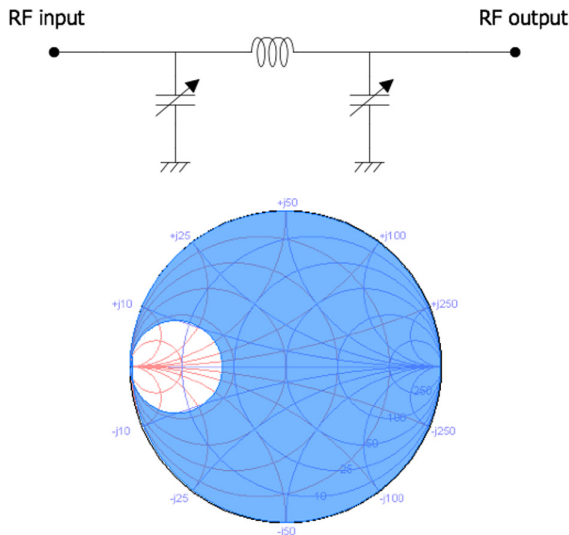


그림 6. Pi type의 회로 구성과 정합 가능한 영역. 소자 구성에 따라 표시된 영역보다 더 넓은 영역을 포함할 수 있다.

를 이용하거나 다른 형태의 정합회로를 사용해야 한다.

3.3. 이중 주파수 정합기

반도체 식각 장비의 경우, 저주파와 고주파 전력을 동시에 인가하는 공정이 있다. 이 경우 고주파와 저주파 정합을 위한 각각의 임피던스 정합기가 있으며, 각 정합기의 출력이 하나로 연결되어 플라즈마 발생장치에 전력을 공급한다.

이중 주파수 정합기는 그 구조로 인해, 한쪽에 전원을 공급할 경우 그 전력이 다른 쪽 전원으로 유입될 수 있다.

한쪽 주파수의 전력이 다른 쪽 주파수의 정합회로로 유입 될 경우, 전력이 유입된 쪽의 정합회로는 더 높은 전류나 전압에 노출되고 정합회로를 통해 전원 공급 장치까지 유입될 경우 전원 공급 장치가 이상 작동하거나 손상될 수도 있다.

이를 방지하기 위해서는 상대방 주파수의 전력이 유입되지 않도록 회로를 구성하는 것이 적절하며 정합회로 자체가 상대방 주파수를 막는 구조로 설계하거나 추가로 필터를 장착하는 방법을 사용한다.

또한, 각 주파수의 전원 입력 측에 배치된 입력 센서가 상대방 주파수에 의한 교란을 방지하기 위해서는 입력센서와 정합회로 사이에 추가적인 필터를 장착하거나 센서의 주파수 영향을 최소화 할 수 있는 측정 방법을 사용한다.

4. 고주파 전원 공급장치(RF generator)

플라즈마 공정에서는 수백 kHz ~ 수십 MHz 대역뿐만 아니라, 수백 MHz ~ 수 GHz 대역의 마이크로웨이브가 사용된다.

마이크로웨이브의 경우 마그네트론 방식을 이용하여 전력을 발생시키지만, 이보다 낮은 주파수에서는 트랜지스터를 이용한 증폭회로를 이용한다.

이 장에서는 증폭회로를 이용하는 고주파 전원장치에 대해 기술하고, 반도체/디스플레이 공정에서 발생하는 몇 가지 현상에 대해 언급한다.

4.1. 고주파 전원 공급 장치의 구조

고주파 전원 장치는 크게 신호발생부, 증폭기, 증폭기에 전력을 공급하기 위한 DC 전원 공급 장치, 여러 개의 단위 증폭기 출력을 연결하는 컴바이너, 주파수 특성을 조정하기 위한 필터, 출력 전력과 반사파를 측정하기 위한 센서, 그리고 전력제어를 위한 제어부로 구성된다.

제어방식은 증폭기에 따라 다른 방식을 취하고 있다. 그림 7 (a)는 선형증폭기를 사용하는 경우의 구조인데, 증폭기의 증폭률이 고정되어 있으며 증폭기 입력의 신호 크기를 조절하여 전력을 원하는 값으로 유지한다. (b)의 경우는 스위칭 증폭기를 이용하는 경우인데, 이 경우에는 증폭기 입력을 제어하는 방식이 아니고 증폭기에 전원을 공급하는 DC 전원 공급 장치의 전압 또는 전류를 제어한다.

위 두 가지 방식은 각기 장단점이 존재하는데, 선형증폭기 구조의 경우 출력의 주파수 스펙트럼에 다음에 설명할 harmonics가 적고 제어 속력이 상대적으로 빠른 장점이 있다. 반면, 증폭기에서의 전력효율이 50~70% 정도로서 스위칭 방식에 비해 효율이 낮아 냉각 기구의 크기가 크고 상대적으로 더 많은 소자들이 필요하다.

스위칭 방식에서는 지정된 주파수로 빠르게 스위치를 켜고 끄는 방식으로 작동하며 전력효율이 80% 이상으로서 매우 높은 효율을 갖는다. 이에 따라 더 적은 수의 증폭기를 이용해 동일한 전력을 공급할 수 있으며, 증폭기에 DC 전력을 공급하는 DC 전원 공급 장치도 크기가 작아지는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 최근 널리 사용되고 있으나 전력제어를 위해 대전력을 공급하는 DC

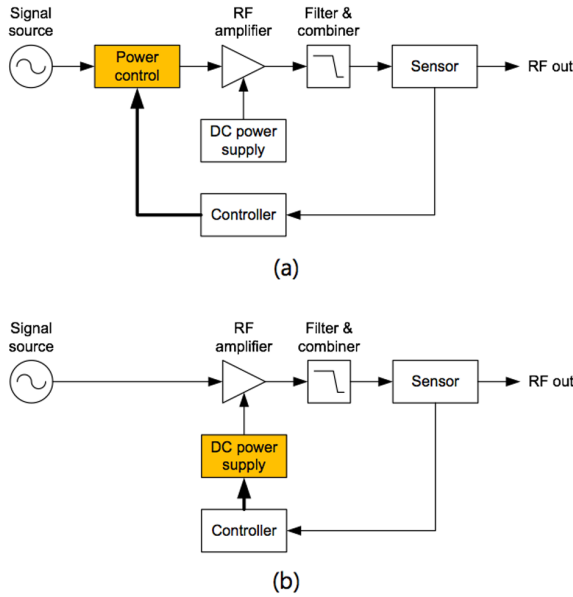


그림 7. (a) 선형증폭기를 사용한 전원 공급장치 (b) 스위칭 증폭기를 이용한 구조

전원장치의 출력을 제어해야 하므로 상대적으로 제어 속도를 빠르게 확보하는 것이 상대적으로 어렵다.^[1]

최근에는 복수개의 스위칭 증폭기를 이용하고 증폭기 입력의 상대위상을 조절하여 빠른 제어를 구현하는 제품도 공급되고 있다.

4.2. 출력 제한 특성

고주파 전원 장치는 반사계수에 따른 최대 전력이 사양으로 기재되는데, 반사계수가 낮을 때는 최대 전력을 공급할 수 있지만 반사계수가 높아질수록 그 전력이 감소한다(그림 8).

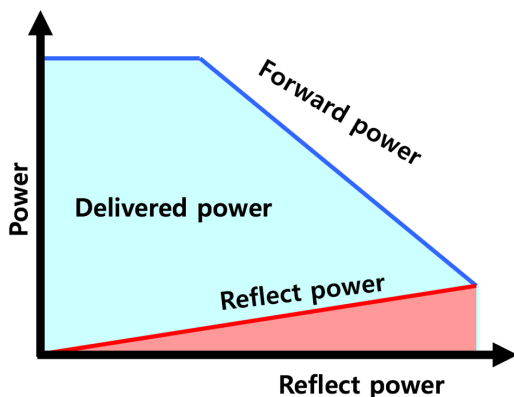


그림 8. 반사파에 따른 출력 제한

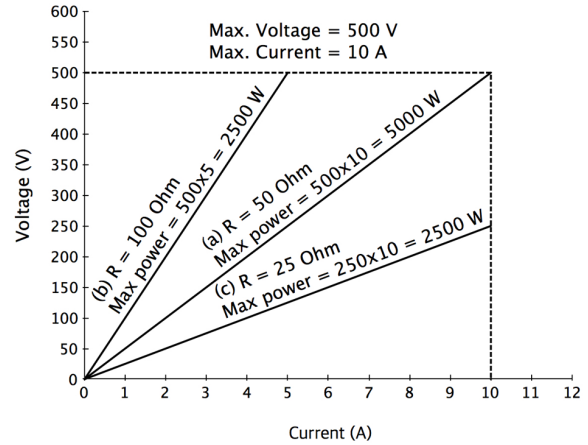


그림 9. 부하에 따른 최대 전력의 변화

이러한 특성은 50Ω 근처에서는 최대전력이 전달 가능하나 50Ω에서 멀어질수록 공급할 수 있는 최대 전력이 감소하는 것으로 이해할 수 있다.

이러한 특성은 고주파 전원 공급 장치에서만 나타나지는 것은 아니며 DC 전원역시 비슷한 특성을 갖는다.

그림 9는 5kW의 최대전력을 갖고, 최대전압 500V, 최대전류는 10A를 갖는 전원 공급 장치 예로서 점선 영역은 사용가능한 전류-전압의 최대 영역이며, 실선 (a) ~ (c)는 부하에 따른 전류-전압 변화를 그린 그래프이다. 고주파 전원 공급 장치 만을 가정한 것은 아니며, DC 전원 공급 장치도 동일하게 적용된다.

(a)는 부하에 50Ω이 연결되어 있을 경우로서, 해당 전원장치가 공급할 수 있는 최대 출력(5kW)를 공급 가능하다. (b)는 50Ω 보다 큰 100Ω이 연결된 경우의 예를 보여주는데, 이 경우 공급 가능한 전류가 1/2로 감소하기 때문에 2.5kW만 공급이 가능하다. (c)는 50Ω보다 작은 25Ω을 연결한 경우로서, 이 경우 최대 전류가 흘러도 전압이 반으로 감소하기 때문에 5kW 공급이 불가능하고 공급할 수 있는 전력이 2.5W로 감소한다.

반사파가 발생하는 경우는 부하가 50 Ω에서 벗어난 경우이기 때문에 이와 같은 원리로 인해 고주파 전원장치에서 출력을 제한하며 이를 반사파 비율에 따라 제어하는 방식이다.

공정 중에는 초기에 전원을 투입하거나 공정 진행 중 조건이 바뀔 때 반사파가 크게 발생 할 경우, 이와 같은 출력 제한 특성에 의해 진행과 전력이 감소할 수 있다. 진행과가 크게 감소할 경우 공정에 영향을 미치거나 임

피던스 정합 또는 전원 출력에 불안정을 야기 할 수 있다. 이를 최소화하기 위해서는 반사파 비율이 상대적으로 커도 진행파 크기를 유지할 수 있는 전원 공급 장치를 선택하거나, 임피던스 정합을 빠르고 안정적으로 유지하는 것이 필요하다.

4.3. 출력 안정성

고주파 전원장치는 출력 센서와 제어기를 통해 전력이 일정하게 유지된다. 하지만 다음의 현상에 의해 출력의 주파수 스펙트럼이 변하거나 제어가 불안정해지는 경우가 있다.

(1) Harmonics

출력 주파수의 정수배에 해당하는 주파수 성분들로서 교류 한 주기 파형의 형태를 결정한다. Harmonics가 없는 경우 완벽한 정현파 형상을 갖지만 그렇지 않을 경우 그 크기와 위상에 따라 각기 다른 형상을 갖는다.

플라즈마 공정장비에 사용되는 대부분의 전원 공급장치에는 harmonics를 제거하기 위해 내부에 필터가 설치되어 있다.^[1]

(2) Spurious

출력 주파수와 다른 주파수 중 harmonics가 아닌 성분들이며 한 파형의 형태를 결정하지 않고, 진폭이 변화하는 형태로 관찰된다. 진폭의 변화가 매우 느리면 제어기를 통해 진폭을 항상 일정하게 맞추는 것이 가능하지만, 제어 속력보다 빠르게 변화하는 경우에는 진폭의 변화가 출력에 그대로 반영된다.

특히 출력 주파수와 가까운 주파수에 spurious가 발생할 경우, 일반적인 필터로 제거하기 매우 어렵다.

대부분의 전원장치들은 이러한 현상이 50 Ω에서는 잘 발생하지 않으나 정합 조건에서 벗어난 경우 이 문제가 발생하는 경우가 있다.

(3) 음이온 플라즈마에서의 제어 불안정

SF6, CF4와 같이 음이온이 많이 생성되는 경우에 관찰되는 현상이다.^[3, 4] 음이온이 많이 생성되는 플라즈마의 경우, 플라즈마 밀도가 수 kHz ~ 수백 kHz의 진동수로 흔들리는 현상이 있는데, 전원장치의 개루프(open-loop) 특성 및 폐루트(closed-loop) 특성에 따라 이 불

안정성이 증폭되는 현상이 발생한다.^[4]

이 현상을 간단하게 해결하는 방법으로서 전원 공급장치와 정합기 사이의 동축선 길이를 변경하는 방법이 있다. 동축선 길이를 변경할 경우, 플라즈마 불안정에 의한 임피던스 변화 방향이 회전하며, 회전한 방향에서의 개루프 특성이 양호할 경우 불안정 특성이 완화된다.^[4]

5. ICP 발생장치

ICP는 코일형태의 안테나를 통해 플라즈마를 발생시킨다.

ICP를 회로적으로 모사 할 경우, 전기 회로의 변압기 회로를 이용하는데 전력이 인가되는 안테나가 1차측 코일에 해당하며, 챔버 내에 발생된 플라즈마는 2차측 코일에 저항이 연결된 형태로 해석한다.^[5]

5.1. 전력 손실

플라즈마 공정장비에 전력을 투입할 때, 투입된 전력 중 일부는 손실되고 나머지가 플라즈마에 흡수된다. 전력손실이 클 경우, 안테나 또는 기타 전력 전송부에 과다한 열이 발생하게 되는데 이러한 열로 인해 냉각 기구의

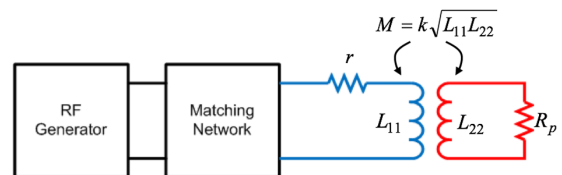
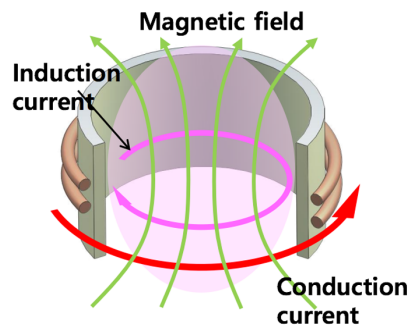


그림 10. ICP의 회로 모델. R_p 는 플라즈마 저항, L_{11} 은 안테나 inductance, L_{22} 는 플라즈마의 inductance, r 은 안테나 실저항이고 M 과 k 는 각각 mutual inductance와 결합상수이다.

장착이 필요하여 유지보수에 불리하고, 냉각기구 장착과 손실분만큼의 전력 공급으로 인해 가격과 운영비용이 높아지는 문제가 있다.

이러한 전력 손실은 주로 안테나의 실저항 성분에서 기인한다. Lieberman이 해석한 결과에서 안테나 실저항을 추가로 고려할 경우 그림 10의 안테나와 플라즈마가 포함된 임피던스는 다음 식과 같다.

$$Z = \left[r + \frac{k^2 \omega^2 R_p L_{11} L_{22}}{R_p^2 + \omega^2 L_{22}^2} \right] + i \omega L_{11} \left[1 - \frac{k^2 \omega^2 L_{22}^2}{R_p^2 + \omega^2 L_{22}^2} \right] \quad [\text{수식 5}]$$

위 수식에서 전체 소모전력 중 플라즈마가 흡수하는 비율은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{P_{\text{plasma}}}{P_{\text{total}}} = \frac{1}{1 + \frac{R_p^2 + \omega^2 L_{22}^2}{k^2 \omega^2 R_p L_{11} L_{22}}} r \quad [\text{수식 6}]$$

$$\approx \frac{1}{1 + \frac{L_{22}}{k^2 L_{11}} \frac{r}{R_p}}, R_p^2 \ll \omega^2 L_{22}^2 \text{ 일 때}$$

위 수식에서 볼 수 있듯이 전력손실을 낮추기 위해서는 안테나-플라즈마의 결합상수를 높이는 방법이 있다. 이 경우 동일한 전력이 공급되더라도 안테나에 흐르는 전류 크기를 줄일 수 있기 때문에 전력 손실이 감소한다.

두 번째는 안테나 실저항을 낮추는 방법으로서, 고주파 전력이 인가되는 도선의 각 체결부의 최소화하고, 표면산화 방지를 위해 코팅을 하거나 온도균을 한다.

세 번째 방법은 플라즈마의 유효 실저항을 높이는 방법이 있는데, 이는 안테나를 여러 번 감을 경우 수식 6의 $L_{11} R_p$ 항이 증가한다. 이 경우 회로적으로 1차측 코일의 감은 수 증가에 따라 전압은 상승하고 전류가 낮아지는 효과로 인해 안테나 실저항에 의한 발열이 억제되는 효과를 갖는다. 하지만, 길어진 코일 길이에 의한 안테나 실저항 증가로 추가 발열과 고전압에 의한 아크 발생의 위험이 있다.

5.2. 기생용량 문제

코일 형태로 안테나를 제작하면, 서로 마주보는 면으로 인해 기생 capacitance가 발생된다.

이러한 capacitance로 인해 안테나는 단순한 inductor가 아닌 inductor와 capacitor가 병렬로 연결된 LC 공진 회로를 형성한다.

단일 inductor 회로에서는 주파수가 증가함에 따라 허수저항이 선형적으로 증가하는 특성을 갖지만, LC 공진회로에서는 공진 주파수 근처에서 매우 큰 변화를 보인다.

제작한 ICP 안테나가 사용하는 주파수 근처에 공진점이 형성될 경우, 플라즈마 특성에 따른 임피던스 변화 역시 매우 크게 변하기 때문에 임피던스 정합기 구성 시 주의가 필요하다.

5.3. 다중안테나 사용

단일 직경을 갖는 안테나를 사용할 경우, 웨이퍼 표면이나 유리 기판 표면에서의 공간적인 균일도가 확보되지 않아 서로 다른 크기의 안테나를 동심원 형태로 배열하는 경우가 있다.

이렇게 동심원 형태로 배열 한 뒤 안테나를 직렬로 연결하면 각 안테나에 흐르는 전류를 조정하기가 어렵고, 두 개의 inductor가 직렬로 연결되는 형태로 인해 전압이 너무 높게 발생하여 고전압 아크로 인한 손상 문제가 발생할 수 있다.

이러한 이유로 인해 안테나들을 병렬로 연결하는 사례들이 일반적이다.

각각의 안테나를 바로 연결 할 경우, 안테나 임피던스에 의해 전류가 분배된다. 이 중에서 inductance가 작은 쪽으로 더 많은 전류가 흐르기 때문에 전류 분배를 조절할 필요가 있다.

다음 그림은 전류 분배를 조정하는 방법의 예시이다.

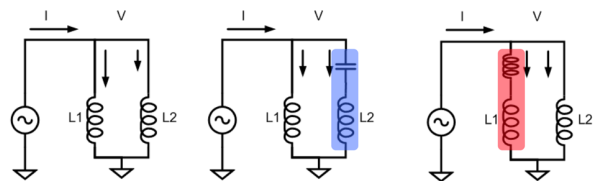


그림 11. 안테나 병렬연결 시 전류 분배를 조절 방법

그림 11에서 좌측 안테나(L1)의 인덕턴스가 우측 안테나(L2)의 인덕턴스보다 작을 경우, 좌측 안테나 쪽으로 더 큰 전류가 흐른다.

(b)는 L2에 capacitor를 직렬로 연결한 경우인데,

capacitor는 음의 허수저항을 갖기 때문에 코일이 갖는 양의 허수저항과 더해져 허수저항이 감소하게 된다. 해당 capacitor의 capacitance를 조절 할 경우 L1과 L2에 흐르는 전류가 동일하게 조절 할 수 있다.

(c)는 L1에 직렬로 추가 코일을 연결한 경우이다. 이 경우 L1쪽의 허수저항이 증가하게 되므로 전류분배의 불균형을 해소 할 수 있다.

분배율을 고정하지 않고, 공정조건에 따라 조절이 필요한 경우는 (b)와 (c)에 추가로 장착한 소자를 가변형으로 변경하여 사용할 수 있다. 하지만, 가변 inductor는 상대적으로 전력손실이 낮고 제품 선택의 폭에 제한이 많아서 (b)의 회로에 가변 capacitor를 사용하는 것이 일반적이다.

6. 결 론

고주파 전원 전달 시스템은 고주파 전원 공급 장치, 임피던스 정합장치, 플라즈마 발생장치로 구성되며, 각각 장치의 구조 및 공정 시 쉽게 접하는 현상과 문제점들을 살펴보았다. 일반 전기회로에 더해 고주파의 특성에 대한 이해가 추가로 필요하기 때문에 공정/장비 엔지니어에게 생소한 분야이고, 다소 어려운 내용이 될 수도 있다.

플라즈마 공정장비에서는 전원 쪽 문제가 아닌 기체 공급, 진공 등의 문제가 발생하더라도 임피던스 정합장치의 가변소자 위치, 반사파 전력의 변화를 통해 문제가 발견되기 때문에 고주파 전원에 대한 이해는 필수적이라 할 수 있다.

이 논문이 고주파 전원에 대해 조금이나마 도움이 되기를 바라며, 논문 외의 문헌 자료를 통해 더 깊은 지식을 습득하기를 추천한다.

참고문헌

- [1] L. E. Frenzel, *RF Power for Industrial Applications*, Prentice Hall, (2003).
- [2] R. Ludwig and P. Bretchko, *RF Circuit Design: Theory and Applications*, Pearson, (2000).
- [3] D. L. Goodman and N. M. P. Benjamin, *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **36**, 2845 (2003).
- [4] V. Brouk and R. Heckman, *Stabilizing RF generator and Plasma Interactions*, Proc. 47th Society of Vacuum Coaters(Dallas), 2004.
- [5] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, 2nd edition, A John Wiley & Sons, 2005

저자약력

이 상 원



- 1995년 : KAIST 물리학과 학사
- 1997년 : KAIST 물리학과 석사
- 2005년 : KAIST 물리학과 박사
- 2016년 : (주)플라즈마트 및 MKS Korea power solution group 연구소장
- 2017년 : 충남대학교 연구교수
- 현재 : 인투코어 테크놀로지 기술혁신팀

• 관심분야: 플라즈마, 전원장치, 반도체/디스플레이 공정, 환경, 에너지