

# 전기적 특성을 고려한 ICP Source 설계

이상원\*

(주)플라즈마트 기술연구소, 대전 305-500

(2009년 4월 30일 받음, 2009년 5월 21일 수정, 2009년 5월 21일 확정)

ICP source의 성능과 구현 가능성은 impedance와 전기장, 자기장의 공간 분포에 큰 영향을 받는다. ICP source의 impedance는 ICP 안테나와 플라즈마의 impedance에 의해 결정된다. 안테나 설계에 있어서 안테나에 형성되는 고전압을 방지하고 공정 중 급격한 impedance 변화를 방지하기 위해서는 ICP source의 허수 impedance가 -100 ohm~+100 ohm의 영역에 존재하는 것이 유리하다. 플라즈마 균일도는 안테나에 흐르는 전류와 전압에 의해 형성되는 전기장 세기와 자기장 세기에 영향을 받는다. 원형 안테나와 대칭성이 개선된 안테나에 대해 전자기 simulation과 플라즈마 밀도의 공간분포를 측정하였으며 안테나 형태에 따른 전자기장과 플라즈마 밀도 분포의 개선을 확인 하였다. 반경 방향 균일도를 조절하기 위해서는 일반적으로 지름이 다른 복수개의 안테나를 동심원 상에 배치하는 방법을 사용한다. 각 안테나들을 병렬로 연결한 경우 각각의 안테나의 임피던스에 따른 전류 분배 비율이 상이하며, 분배 비율을 조절하기 위해 코일 또는 capacitor를 연결할 경우 나타나는 현상을 계산하였다.

주제어 : 플라즈마, ICP source, Impedance, Uniformity

## I. 서 론

ICP(Inductively Coupled Plasma) source는 coil 형태의 antenna를 장착하여 플라즈마를 발생시키는 장치로서 일반적으로 고밀도 플라즈마가 필요한 공정에 적용된다.

전극을 이용하여 플라즈마를 발생시키는 CCP (Capacitively Coupled Plasma) source는 축전전기장을 이용하여 전자에 에너지를 전달하나 ICP는 유도전기장을 이용하여 전자에 에너지를 전달한다.

일반적으로 ICP는 CCP에 비해 10배 이상의 고밀도 플라즈마를 발생시키며 CCP에 비해 상대적으로 높은 전자온도를 유지한다. 이러한 특성으로 인해 기체 해리율이 높아 중성 활성화종과 이온 밀도가 높은 특성을 갖는다 [1].

또한 ICP에 의해 생성된 플라즈마는 플라즈마 전위가 CCP에 비해 상대적으로 낮고 플라즈마 전위가 RF 주파수에 따라 변화하는 폭이 작다. 따라서 ICP source로 플라즈마를 발생시키고 기판에 고주파 전력을 추가로 인가할 경우 기판에 입사하는 이온의 에너지는 주로 기판에 인가된 전력에 의해서만 영향을 받아 이온에너지의 독립제어가 가능한 장점을 갖는다.

이러한 장점을 바탕으로 ICP는 식각공정, 증착공정 및

세정 공정에 널리 사용되고 있다.

ICP를 공정에 적용하기 위해서는 해당 공정에 적절한 ICP 안테나를 개발해야 한다. 해외 반도체 장비 제조사는 각자 독자적인 ICP source를 개발하여 장비에 탑재하고 있으나 국내에서는 독자적인 ICP source 개발이 미진한 실정이다.

본 논문에서는 ICP source를 개발하는 데 있어서 발생할 수 있는 문제점과 해결방안을 소개하고자 한다.

## II. ICP 안테나 impedance의 특성과 효과

### 1. ICP source의 impedance

ICP source는 일반적으로 수백 kHz~수십 MHz의 고주파 전력을 이용하여 플라즈마를 발생시킨다. 따라서 고주파 전력에서의 전기적 특성에 대한 이해가 반드시 필요하며, 특히 ICP source의 impedance에 대한 이해는 ICP source 개발에 있어서 핵심 요소 중 하나이다.

ICP의 전기적 특성을 파악하기 위해서는 전기적 모델링이 필요한데, 주로 Fig. 1과 같은 transformer 형태의 등

\* [전자우편] swlee@plasmart.com

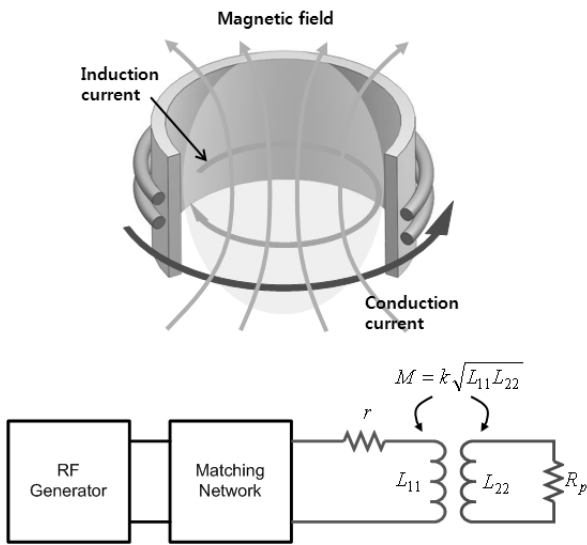


Figure 1. The structure of ICP source and its circuit model.

가 회로를 이용한 모델링을 사용한다 [2].

Fig. 1에서  $r$ 은 안테나의 실저항이고  $L_{11}$ 은 안테나의 inductance를 표시한다. 안테나에 전류가 흐르면 자기장이 유도되며 이 자기장이 다시 플라즈마에 전류를 유도하게 된다. 이 때 플라즈마 내부에 발생하는 전류에 의한 유효 inductance가  $L_{22}$ 이며,  $R_p$ 는 플라즈마의 저항이다.  $M$ 은 안테나와 플라즈마 사이의 mutual inductance로서 결합상수  $k$ 와 두 inductance 곱의 제곱근  $\sqrt{L_{11}L_{22}}$ 의 곱으로 표현된다. Mutual inductance와 결합상수  $k$ 는 안테나에서 생성된 자기장에 플라즈마에 얼마나 효과적으로 영향을 미치는지 나타내는 척도가 된다.

Fig. 1의 전기적 modeling을 바탕으로 플라즈마를 포함한 ICP source의 impedance를 계산할 수 있으며, 전체 impedance  $Z_s$ 는 다음과 같다.

$$Z_s = r + i\omega L_{11} + \frac{\omega^2 M^2}{R_p + i\omega L_{22}} \quad (1)$$

$$= \left( r + \frac{k^2 \omega^2 R_p L_{11} L_{22}}{R_p^2 + \omega^2 L_{22}^2} \right) + i\omega L_{11} \left( 1 - \frac{k^2 \omega^2 L_{22}^2}{R_p^2 + \omega^2 L_{22}^2} \right)$$

13.56 MHz 고주파전력을 사용하는 ICP에서는 플라즈마 실저항  $R_p$ 가 수 ohm의 값을 가지며,  $L_{11}$ ,  $L_{22}$ 는 수백 nH 이상의 값을 갖는다. 이 경우  $R_p \ll L_{11}, L_{22}$ 의 조건이 되어 위 식은 다음과 같이 근사 할 수 있다.

$$Z_s \approx \left( r + \frac{k^2 R_p L_{11}}{L_{22}} \right) + i\omega L_{11} (1 - k^2) \quad (2)$$

위 식에서 볼 수 있듯이 플라즈마 실저항이 감소 할수록 전체 impedance의 실저항 역시 감소함을 볼 수 있다. 또한 허수저항 부분은 안테나 impedance에 비례하고 결합 상수가 1에 가까울수록 작아지는 특성을 갖는다.

고주파 전력이 입사될 경우 전력은 실저항 성분에 의해 소모되며  $P = I^2 Re[Z_s]$ 의 관계를 갖는다. 따라서 실저항이 낮을 경우에는 많은 전류가 흐르게 되며 플라즈마와 안테나에서 소모하는 전력은 각각 다음과 같은 비율을 갖는다.

$$P_{antenna} : P_{plasma} = r : \frac{k^2 R_p L_{11}}{L_{22}} \quad (3)$$

위의 식에서 볼 수 있듯이 안테나 실저항이 클 경우에는 고주파 전력이 플라즈마에 전달되지 못하고 안테나 발열로만 손실되는 것을 알 수 있다. 안테나에서 손실되는 전력을 최소화하기 위해서는 안테나 실저항을 낮추거나, 결합상수를 높이거나, 플라즈마 inductance 대비 안테나 inductance 비율을 높여야 한다. 전체 실저항이 낮아 전류가 많이 흐를 경우, 전력 손실 뿐만 아니라 냉각을 위해 많은 유량의 냉각수가 필요하여 장비 구성이 복잡해지는 단점이 있다.

전력 손실을 최소화 하기 위해 열거한 세가지 방법들 중에서, 안테나 실저항을 낮추기 위해서는 전기전도도가 높은 금속을 사용하고 표면에 은도금을 하는 방법이 주로 사용된다.

두 번째 방법인 결합 상수를 높이기 위해서는 안테나와 플라즈마 사이 간격을 최소화하거나 ferrite와 같이 자화율이 높은 물질을 사용하여 안테나에서 생성된 자기장이 플라즈마에 효과적으로 결합되도록 해야 한다.

세 번째로, Inductance 비율을 높이기 위한 방법으로는 안테나를 감은 횟수를 증가시키는 방법이 있다. Inductance는 코일을 감은 회수의 제곱에 비례하고 플라즈마의 inductance는 안테나 inductance와 무관하므로 전체적으로 플라즈마 실저항이 높아지는 효과를 가져와 전력 손실을 막을 수 있다.

하지만 코일의 감은 횟수를 증가할 경우 크게 2가지 단점이 있는데, 첫 번째는 코일 길이가 길어짐에 따라 안테나 실저항 역시 같이 증가하여 나타나는 전력 손실과, 두 번째

는 안테나 임피던스 증가로 인해 안테나 양단에 고전압이 형성되는 문제이다. ICP source에 전력이 입사할 경우 안테나 양단에 형성되는 전압은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_{rms} = \sqrt{Re[Z_s]P} \sqrt{1 + \frac{Im[Z_s]^2}{Re[Z_s]^2}} \quad (4)$$

안테나에 고전압이 형성될 경우에는 아크가 발생하거나 안테나 주변에서의 코로나 방전으로 인해 인체에 해로운 오존이 발생할 수 있으며 다음에서 설명할 impedance matching 불안정을 야기할 수 있으므로 신중히 고려하여야 한다.

## 2. ICP source의 impedance matching

고주파 전원 장치에서 전기적 부하에 전력을 전달할 때, 반사파 없이 최대 전력이 전달되기 위해서는 전원 장치의 impedance  $Z_s$ 와 부하의 impedance  $Z_L$ 가 복소 공액형태인  $Z_s = Z_L^*$ 의 관계를 가져야 하며, 이러한 전기적 특성을 갖도록 impedance를 조절하는 것을 impedance matching이라 한다 [3].

플라즈마는 압력, 고주파 전력, 사용 기체 등과 같은 발생 조건에 따라 전기적인 특성인 impedance가 변화하게 되는데 impedance가 RF generator의 출력 impedance와 matching되지 않을 경우 일정한 전력이 전달되지 못해 공정 중 플라즈마 밀도가 변하고 이로 인해 공정 결과의 편차가 높아지는 문제가 발생한다.

고주파 전력을 반사 없이 전달하기 위해서는 impedance matching을 고려해야 하며 이를 위해 RF generator와 ICP 안테나 사이에 impedance matcher를 사용한다.

Impedance matcher는 부하의 impedance를 50 ohm이 되도록 변환하는 역할을 하게 되는데, 모든 impedance를 50 ohm으로 변환하기는 어려우며 matcher에 따라 변환할 수 있는 impedance 영역이 존재한다. 따라서 새로운 ICP 안테나를 설계할 경우 되도록 impedance matcher가 50 ohm으로 변환하기 용이한 impedance가 형성되어야 공정 적용이 수월해 진다.

ICP에 많이 사용되는 13.56 MHz 고주파 전력을 사용하는 경우에는 일반적으로 standard L-type이라는 형태의 matcher를 구성하게 되며, 이러한 matcher가 matching

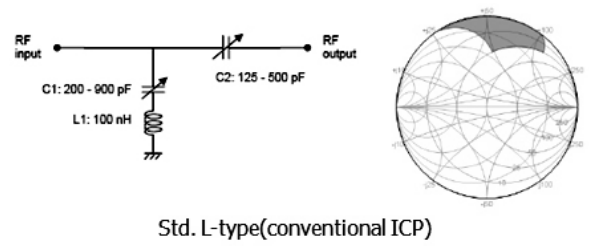


Figure 2. Typical impedance matcher for ICP source.

하기에 적절한 impedance 영역은 허수 저항의 경우  $-100 \text{ ohm} \sim +100 \text{ ohm}$ , 실수 저항의 경우  $1 \text{ ohm} \sim 50 \text{ ohm}$  사이가 된다 (Fig. 2).

위 영역을 벗어날 경우에는 “1. ICP source의 impedance”에서 언급한 바와 같이 안테나에 과전류가 흐르거나 고전압이 형성되어 아크가 발생할 수 있으며, 고전압/고전류 사양의 가변소자를 사용해야 하므로 소자 선택 폭이 좁아져 impedance matcher를 구현하기 어려워진다.

이러한 고전압/고전류 발생 문제 외에도 impedance가 높은 경우, 안테나의 병렬 공진점과 근접하여 matching 특성이 불안정해 지는 경우가 발생할 수 있다.

안테나의 병렬공진은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 기생 capacitance에 의해 발생한다. Coil형태의 안테나는 이상적인 경우 순수한 inductor로 작용하게 되어 impedance가 주파수에 대하여 선형적으로 증가하는 특성을 갖는다. 하지만, 구조적으로 안테나 사이에 기생 capacitance가 형성되어 inductor와 capacitor가 병렬로 연결된 회로 구조를 갖게 된다.

Inductor와 capacitor가 병렬 연결된 경우 전체 impedance는 다음과 같다.

$$Z = i\omega L / (1 - LC\omega^2) \quad (5)$$

위 식에서 볼 수 있듯이, 병렬 공진회로는 주파수가 낮을

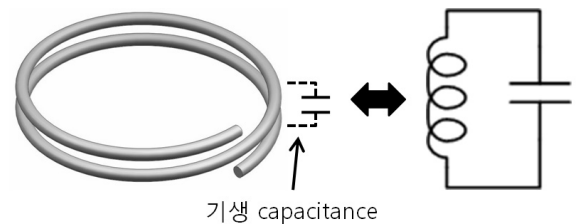


Figure 3. Stray capacitance which is formed in the ICP coil and its equivalent circuit.

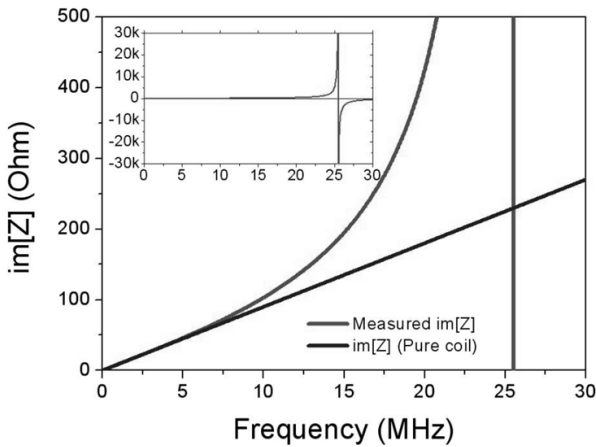


Figure 4. Impedance characteristics of an ideal ICP coil and a practical one.

때는 inductor의 특성을 갖지만, Fig. 4와 같이 주파수가 증가함에 따라 impedance가 급격히 상승한 뒤 다시 급격히 낮아지는 특성을 갖게 된다. 이렇게 급격한 변화가 나타나는 지점을 자기공진주파수라고 부르는데 이 영역에서는 허수 impedance의 크기가 클 뿐만 아니라 변화가 급격하여 impedance matcher를 구성하기 매우 어려워진다.

ICP 안테나 제작 시 발생하는 기생 capacitance는 수 pF~수십 pF 사이의 값으로서 13.56MHz 전력을 사용하는 안테나의 경우 1 uH 이상의 inductance를 갖는 안테나는 기생 capacitance에 의한 병렬공진의 영향을 받을 수 있다. 병렬공진의 영향을 최소화하기 위해서는 안테나의

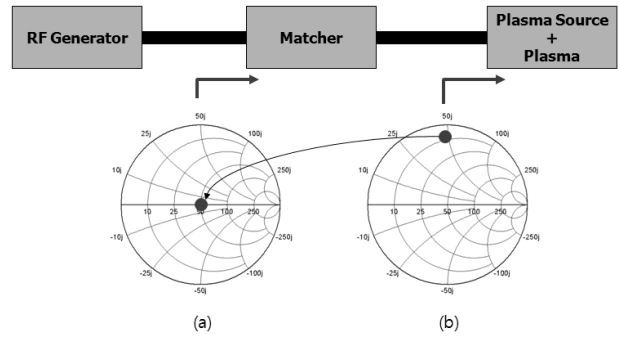


Figure 5. Role of impedance matcher.

inductance를 낮추거나 기생 capacitance가 최소화 되도록 설계/제작해야 하며, 이 두 가지 방법을 적용하기 어려운 경우에는 고주파 전원의 주파수를 낮추는 것을 검토해야 한다.

### 3. Impedance matcher

플라즈마 발생을 위해 ICP source에 고주파 전력을 인가할 경우, 플라즈마의 전기적 특성과 ICP source의 impedance에 의해 전체 impedance가 결정된다.

Fig. 5는 impedance matcher의 역할을 표시한 그림이다. 대표적인 ICP source의 경우 허수 저항 성분이 수십 ohm의 값을 갖는다. RF generator는 부하의 impedance가 50 ohm일 때 반사파 없이 최대 전력을 전달할 수 있으

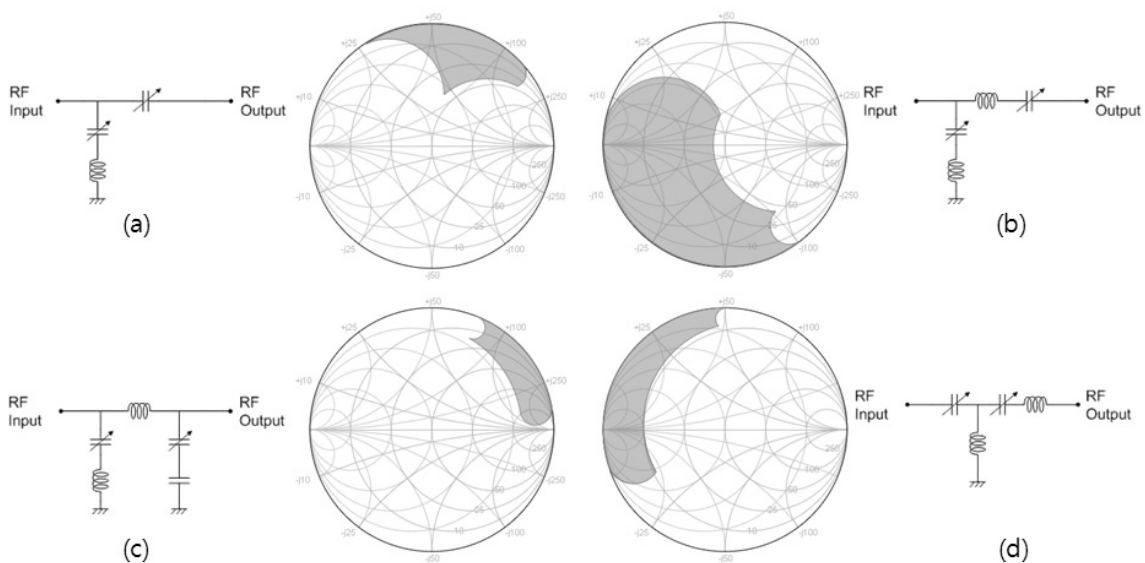


Figure 6. Matching networks for various load impedance.

므로 impedance matcher 없이 사용 할 경우 전력 전달이 용이하지 않다. 하지만 impedance matcher를 RF generator와 플라즈마 source 사이에 장착할 경우 플라즈마 source의 impedance를 50 ohm으로 변환하여 RF generator의 출력이 모두 전달될 수 있도록 한다.

Fig. 6은 플라즈마 공정에서 많이 사용되는 impedance matcher의 내부 회로와 matching 가능한 impedance 영역이다. 그래프에 나타난 Smith chart에 표시된 영역은 해당 matcher가 matching 할 수 있는 부하 impedance 영역을 표시한 결과로서, 플라즈마 발생장치의 impedance가 그 영역에 존재할 경우 50 ohm으로 변환 할 수 있음을 표시한다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 13.56 MHz 전력을 사용하는 플라즈마 source에서 가장 널리 사용되는 matching 회로로서 standard L type이라는 이름으로 널리 알려져 있으며, (a)는 ICP source (b)는 CCP source 용으로 사용된다. Standard L type은 impedance의 실저항이 50 ohm 이하이고, 허수 저항 성분이 -100 ohm~+100 ohm 사이일 경우 사용하기에 적절하며 CCP source에서는 (b)와 같이 RF 출력 단에 직렬로 inductor를 장착한다.

허수 저항이 높은 경우에 standard L type으로 사용할 경우 RF 출력에 연결된 직렬 capacitor의 용량이 수십 pF 이하로 낮아져야하는데 이러한 가변 소자는 다양하지 않으므로 (c)와 같은 형태의 matching 회로를 사용한다. Fig. 6 (c)는 pi type으로 알려져 있으며 실저항 성분이 50 ohm보다 큰 경우와 허수 저항이 높은 경우에도 적용이 가능하다.

Fig. 6 (d)는 T type으로 알려져 있는데, LCD 장비와 같이 대면적 CCP source에 주로 적용된다. 대면적 CCP source에서는 실저항이 매우 낮은 특징이 있는데, standard L type과 비슷한 실저항 성분이 낮은 경우에 상대적으로 낮은 사양의 가변 소자를 사용할 수 있다.

플라즈마 공정에 적용되는 impedance matcher는 위에서 언급한 종류의 matching 회로를 바탕으로 공정 조건 변화 시, 또는 공정 중 나타나는 impedance 변화를 추적하여 항상 50 ohm을 유지할 수 있는 automatic impedance matcher를 사용한다.

Fig. 7은 automatic impedance matcher의 개략도로서 실제 impedance matching을 수행하는 matching circuit과 가변소자를 변경해주기 위한 motor controller/driver, impedance를 측정하기 위한 input sensor, 그리고 sensor

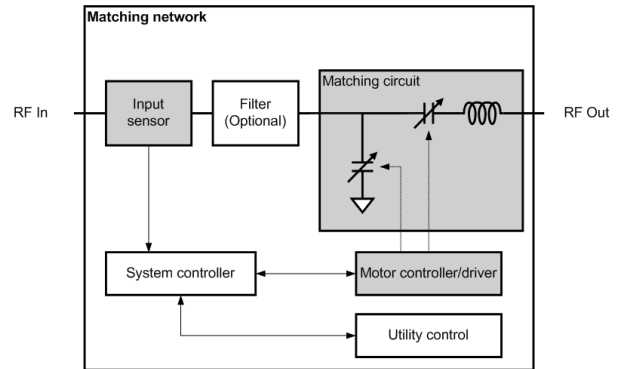


Figure 7. Schematic diagram of a typical automatic impedance matcher.

에서 측정된 impedance를 바탕으로 가변소자의 값을 결정해주는 algorithm이 탑재된 system controller로 구성된다. 플라즈마 발생을 위해 2개 주파수 이상의 RF generator를 사용할 경우에는 RF generator의 오동작을 방지하고 보호하기 위해 input sensor와 matching circuit 사이에 filter를 장착하여 사용한다.

### III. 균일도

지난 수 십 년 간 반도체/평판 디스플레이 제조사는 소자의 제조 단가를 낮추기 위해 노력해 왔다. 평판 디스플레이 공정의 경우 한 번의 공정에서 여러 개의 기판을 처리할 수 있도록 대면적화에 주력해 왔으며 반도체 역시 소자의 집적화와 더불어 더 넓은 면적의 웨이퍼를 이용한 공정을 개발해 왔다.

대면적 기판 공정에서의 가장 큰 문제는 균일도 확보의 어려움이다. 균일도가 낮을 경우 하나의 기판에서 제작된 소자의 특성 편차가 커져 수율이 낮아지는 문제가 발생한다. 따라서 기판의 면적이 증가하더라도 공정 균일도는 동일하게 요구될 뿐만 아니라 최근 소자의 선폭이 감소함에 따라 더 낮은 공정 편차가 요구되어 점점 더 높은 균일도가 요구되고 있다.

공정의 균일도는 기판의 온도 분포, 기체의 흐름 등에도 영향을 받지만 플라즈마의 균일도가 매우 큰 영향을 미친다.

균일도 확보를 위해서는 플라즈마의 회전방향 대칭성과 반경방향 균일도를 분리하여 접근하는 것이 유리하며 특히 ICP에서는 회전방향 대칭성 확보가 가장 핵심적인 요소이다.

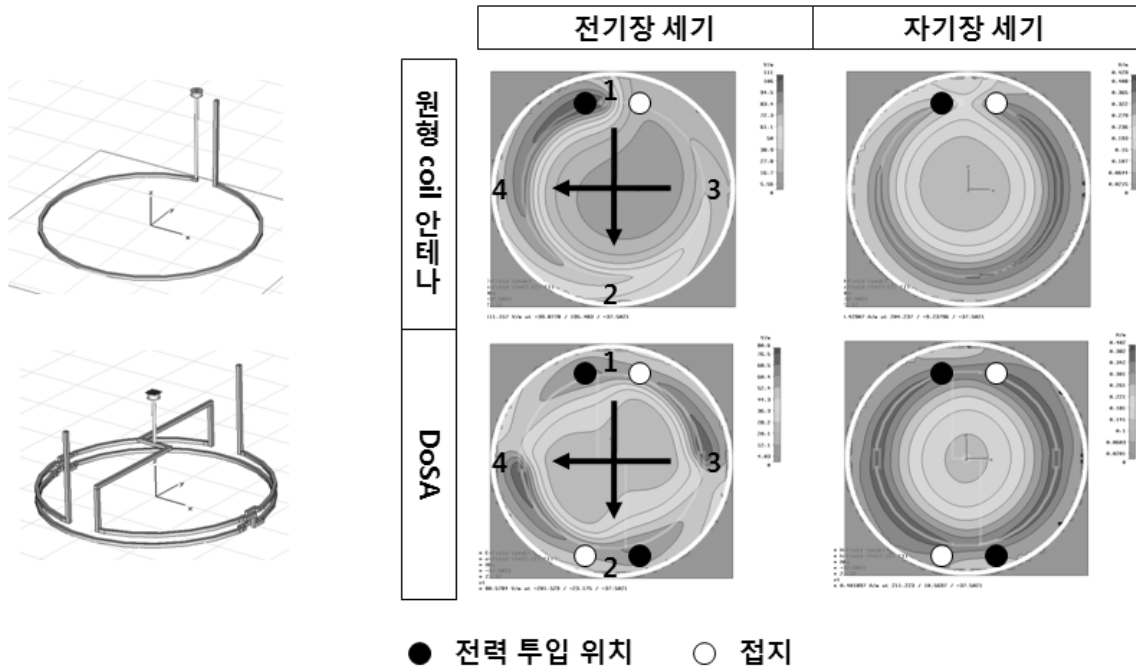


Figure 8. Electromagnetic field distributions of a conventional ICP antenna and the DoSA.

### 1. 회전방향 균일도

일반적인 원형 코일 형태의 ICP는 한쪽에 고주파 전력이 인가되고 다른 한쪽이 접지로 연결되는 구조를 갖는다.

플라즈마는 ICP 안테나로부터 형성되는 전기장/자기장에 의해 발생되고 유지되는데, ICP 안테나의 형상 자체가 대칭성을 갖고 있지 않을 경우 전자기장의 세기 분포가 달라지고 이로 인해 플라즈마 밀도 분포 역시 불균일해진다.

Fig. 8은 원형 coil 안테나와 (주)플라즈마트에서 개발한 안테나의 형상과 CST사의 MicrowaveStudio로 계산한 전기장, 자기장 분포 형태를 비교한 결과이다.

전기장/자기장 분포 결과에서 볼 수 있듯이 원형 코일 안테나에서는 고주파 전력이 인가되는 부분의 전기장 세기가 가장 크고 접지 쪽은 낮아 매우 불균일한 분포를 갖고 있으며, 자기장 세기는 전기장 세기에 비해 균일하지만 전력이 인가되는 부분과 접지 사이의 세기가 저하되는 양상을 갖는다.

전기장 세기의 불균일성을 해결하기 위해 Faraday shield를 사용하여 안테나의 축전 전기장은 차단하고 유도 전기장만 플라즈마에 전달하는 방법이 있다 [4][5]. 하지만 Faraday shield를 사용할 경우 축전 전기장이 너무 약화되어 플라즈마의 초기 발생이 어려워지는 단점이 있으며,

Faraday shield에서 전력 손실이 일어나 플라즈마 밀도가 낮아지거나 금속 재질의 shield와 안테나 사이의 아크를 방지하기 위한 보완이 필요하다.

따라서 원형 코일 안테나의 문제점을 보완하기 위해서는 안테나의 전압을 적절히 분배하고 RF power가 인가되는 부분과 접지 쪽의 단절 부를 보완할 수 있어야 한다.

Fig. 8에 표시된 DoSA는 축전전기장의 세기를 분배할 수 있도록 안테나 2개를 병렬배치하고, RF power/접지 사이의 단절 부를 상대방 안테나가 보완할 수 있는 구조를 갖고 있다 [6].

그림에서 표시된 전기장은 주로 축전전기장의 세기를 반영하며 원형 안테나에 비해 DoSA가 회전방향에 대해 더 좋은 대칭성을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 유도 전기장을 생성하는 자기장 세기 역시 원형 안테나에 비해 더 균일한 결과를 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 이 두 가지 안테나를 이용하여 플라즈마를 발생시키고 Langmuir probe를 이용하여 밀도 분포를 측정 한 그림이다. 그래프를 표시하는 숫자는 Fig. 8에 표시된 위치로서 Langmuir probe가 선형적으로 이동한 방향을 표시한다.

Fig. 8과 Fig. 9의 결과를 비교할 경우 플라즈마 밀도 분포는 축전 전기장 세기보다는 자기장에 큰 영향을 받는 것

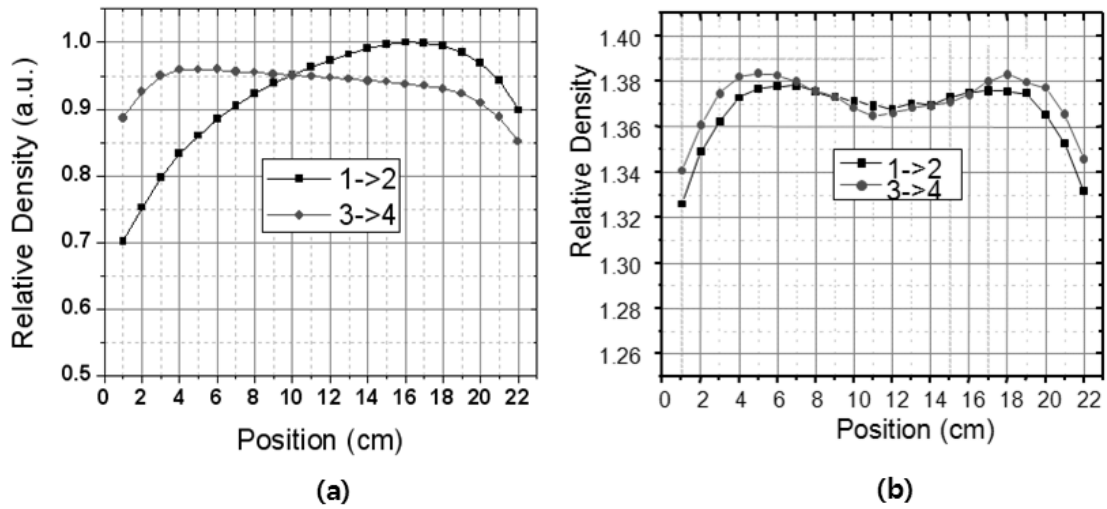


Figure 9. Plasma density distribution measurement result. (a) the case of conventional circular antenna. (b) the case of DoSA.

을 볼 수 있다. 플라즈마 내에서는 안테나에 의해 발생된 자기장과 수직한 방향으로 유도 전기장을 형성되는데, 이 유도 전기장이 ICP를 발생시키는데 주된 역할을 한다. 따라서, 플라즈마 밀도 분포의 회전 방향 대칭성을 향상시키기 위해서는 특히 자기장 분포를 균일하게 형성할 수 있는 안테나 구조를 고안 해야 한다.

## 2. 반경방향 균일도

변경 방향 균일도는 웨이퍼 중앙과 가장자리의 공정결과를 균일하도록 조절하는데 중요한 역할을 한다.

안테나에 전류가 흐를 경우, 안테나 근처에서 가장 강한 유도 전기장이 형성되기 때문에 안테나 바로 근처에서 가장 높은 밀도를 갖는 형태를 갖고, 이렇게 형성된 분포가 웨이퍼 표면에서는 확산에 의해 점점 볼록한 형태의 밀도 분포를 갖게 된다.

특히 웨이퍼 가장자리는 챔버 벽면과 인접하여 플라즈마의 표면 손실이 높아지므로 급격한 밀도저하가 관찰되어, 볼록한 형태의 밀도 분포를 개선하기 위해 안테나의 직경을 증가시키더라도 웨이퍼 안쪽과 가장자리가 낮고 그 사이가 높은 낙타등 형태의 플라즈마 밀도 분포가 형성될 수 있다.

이 문제를 개선하기 위해 대부분 2개 이상의 복수개의 안테나를 동심원 형태로 배치하는 방법을 사용하고, 안쪽 안테나와 바깥쪽 안테나의 위치를 조절하여 웨이퍼 전 면

적에서 균일한 플라즈마 밀도를 형성 시킨다.

복수개의 안테나를 병렬로 연결하여 배치할 경우 각각의 안테나의 impedance에 따라 각 안테나를 통해 전달되는 전력의 분배를 고려해야 한다.

원형 코일 안테나의 경우 직경이 클수록 impedance가 큰 특성을 갖고 있는데, 내부/외부 안테나를 바로 병렬 연결할 경우 주로 안쪽 안테나로 전류가 흐르게 됨에 따라 볼록한 형태의 플라즈마 밀도 분포가 나타날 수 있다. 따라서 안테나 자체의 impedance를 조절하거나 각각의 소자를 추가 장착하여 안테나에 흐르는 전류를 적절히 분배해야 한다. 안테나의 impedance는 그 형태에 의해 결정되므로 변경이 어려우며, 주로 안테나에 적절한 소자를 장착하는 방법으로 전류 분배를 조절하게 된다. Fig. 10의 (b), (c)는 안테나에 부가적인 소자를 연결하는 방법을 나타낸다.

Fig. 10은  $L_1$ 의 impedance가  $L_2$ 에 비해 작은 경우에 대해 부가적인 전기 소자를 연결한 효과를 표시한 그림이다.

$L_1, L_2$ 로 표시된 안테나와 플라즈마의 impedance를 각각  $Z_1 = R_1 + iX_1, Z_2 = R_2 + iX_2$ 로 표시할 경우 각 안테나를 통해 전달되는 전력의 비율은 다음과 같다.

$$P_1 : P_2 = I_1^2 R_1 : I_2^2 R_2 = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} : \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (6)$$

$$= \sqrt{1 + \frac{X_2^2}{R_2^2}} : \sqrt{1 + \frac{X_1^2}{R_1^2}}$$

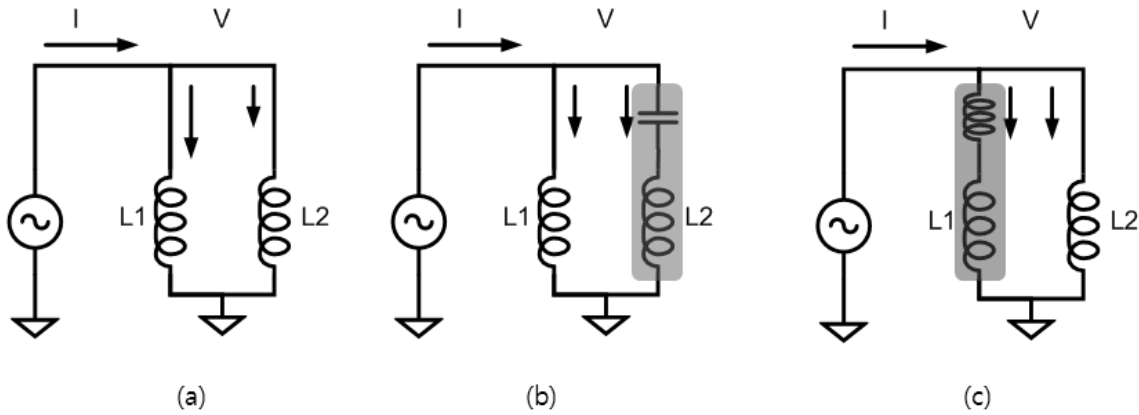


Figure 10. Effect of the current distribution of parallel antennas with additional electric components. It is assumed that the inductance of  $L_1$  is lower than that of  $L_2$ .

일반적인 ICP 안테나에서는 허수 저항이 실수저항보다 크므로 전체 전력 분배는 허수저항의 크기가 작은 쪽으로 전력이 많이 전달됨을 알 수 있다.

Fig. 10 (b)은  $L_2$ 에 직렬 capacitor를 연결하여 허수 impedance를 감소시킨 경우로서  $L_2$ 쪽의 impedance가 낮추어 전류비를 조절하는 경우이며, (c)는  $L_1$ 에 inductor를 추가하여  $L_1$ 쪽의 impedance를 증가하여 비율을 조절하는 경우이다.

$L_2$ 쪽으로 흐르는 전류 비율을 증가시키기 위해 Fig. 10의 (b), (c) 방법 모두 사용할 수 있으나 (b)의 경우 전체 impedance가 낮아지고 (c)의 경우는 전체 impedance가 높아지게 되므로 impedance matcher의 matching 가능 영역과 고전압 발생 위험성을 고려하여 조절 방법을 선택해야 한다.

#### IV. 결 론

ICP source 설계를 위해서는 고주파에서의 플라즈마, 안테나의 전기적 특성 파악이 매우 중요하다. 특히 병렬 공진 발생 시 플라즈마 조건 변화에 따라 전체 impedance가 너무 급격히 변화할 수 있으므로 안테나 설계 시 안테나의 inductance와 기생 capacitance를 예측하여 제작된 안테나가 병렬공진이 발생하지 않도록 방지해야 한다.

ICP source에서 중요한 문제점인 균일도 확보를 위해서는 크게 회전 방향 균일도와 반경 방향 균일도를 나누어 고려하는 것이 설계에 용이하다. 특히 회전 방향 대칭성을 향

상시키는 것이 전체 균일도 확보에 매우 큰 영향을 미친다. 전기장/자기장의 공간 분포는 안테나 형상에 의해 크게 영향을 받으므로, 형상 자체를 대칭성 있게 설계하는 것이 중요하다. 이 영향을 알아보기 위해 원형 코일 안테나와 DoSA를 이용하여 플라즈마 밀도 측정 및 전자기장 시뮬레이션을 수행하였고, DoSA의 경우가 더 높은 대칭성을 갖는 것을 확인하였다.

반경 방향 균일도 조절을 위해서 2개의 안테나를 동심원상에 배치한 경우 각 안테나 impedance에 따른 전력 분배 효과를 연구하였다. 병렬 연결 시, impedance가 낮은 쪽으로 전력이 더 많이 전달될 수 있으며, 각각의 안테나에 코일이나 capacitor를 연결할 경우 전력 분배율을 계산하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2009년 지식경제부 나노반도체장비 원천기술 상용화 사업과 2006년 산업자원부 부품소재 개발사업의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] Y. Hikosaka, M. Nakamura, and H. Sugai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 2157 (1994).
- [2] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*



- (John Wiley & Sons, Inc, 1994), pp. 392-394.
- [3] R. Ludwig and P. Bretchko, *RF Circuit Design* (Prentice-Hall, 2000), pp. 89-91.
- [4] M. H. Khater and L. J. Overzet, *J. Vac. Sci. Technol.* **A19**(3), 785 (2001).
- [5] H. Sugai, K. Nakamura, and K. Suzuki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** 2189 (1994).
- [6] Y. K. Lee, S. W. Lee, and S. H. Uhm, Republic of Korea patent, 10-0488363-0000 (2005).

## Design of an Inductively Coupled Plasma Source with Consideration of Electrical Properties and its Practical Issues

S. W. Lee\*

*PLASMART Inc., Daejeon 305-500*

(Received April 30, 2009, Revised May 21, 2009, Accepted May 21, 2009)

The realization and the performance of ICP source are strongly affected by its electrical impedance and the electric/magnetic field distribution. The ICP source impedance is determined by the antenna impedance and the plasma one. It is preferred to keep the imaginary impedance between -100 ohm to 100 ohm, since it should be avoided the high voltage formation on the antenna and abrupt impedance variation during the thin film process. The plasma uniformity is affected by the electric and magnetic field which is formed by the antenna current and voltage. The influence of azimuthal symmetry are shown by the electromagnetic simulation and the measurement result of plasma density. The radial uniformity can be controlled by locating the concentric antennas which have different diameters. The power distribution ratio and its control method are presented in the case of parallel antenna connections.

Keywords : Plasma, ICP source, Impedance, Uniformity

\* [E-mail] [swlee@plasmart.com](mailto:swlee@plasmart.com)