

400 kHz 페라이트 유도 결합 플라즈마를 위한 임피던스 매칭 네트워크

조성원[†] · 방진영 · 이영광 · 정진욱

[†]서울시 성동구 행당동 17번지 한양대학교 전기공학과

The Impedance Matching Network for a ferromagnetic Inductively Coupled Plasma driven at 400 kHz.

Sung Won Cho[†], Jin Young Bang, Young Kwang Lee and Chin Wook Chung

[†]Dept. of Electrical Engineering, Han Yang University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Low frequency (400 kHz) Ferrite ICP has been proposed for large area processing. Because the coupling coefficient is close to 1, the transformer matching can be adapted to Ferrite ICP. The transformer matching system is simple. In this paper the new matching system by controlling the turns of transformer using relays is proposed for impedance matching. We developed a simple matching system and characterized it when the turns were changed. It was observed that the 2-channel relay is available for transformer matching.

Key Words : Inductive coupled plasma, Impedance Matching, Ferrite core

1. 서 론

저온 플라즈마는 반도체 산업분야에 널리 이용되고 있으며 특히 고집적 대면적 공정을 위해 다양한 플라즈마 원들이 개발되고 있다[1]. 그 중 유도 결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma, ICP)는 높은 밀도를 요구하는 플라즈마 공정에 많이 사용되고 있다. 최근 활발히 연구되고 있는 저주파 페라이트(Ferrite) ICP는 대면적 반도체 공정을 위해서 개발된 플라즈마 원 중 하나이다.

페라이트 ICP는 기존의 ICP에 비해 안테나 전류가 감소하고, 전력전달 효율이 증가하는 장점을 가지고 있다. 그리고 최근 연구에서는 페라이트의 구조에 따라서 높은 플라즈마 밀도와 균일도를 보여주었다[2].

플라즈마를 이용하는 반도체 공정에서 가장 중요한 부분 중 하나가 임피던스 매칭 네트워크(Impedance Matching Network)이다. 실제 반도체 공정 중 가장 많이 발생하는 오류 중 하나는 RF Generator가 플라즈마

원으로 전력을 전달하는 과정에 임피던스 매칭(Impedance Matching)이 맞지 않아서 일어나는 경우이다. 일반적인 ICP매칭의 경우 다수의 가변공기축전기(Air Variable Capacitor, AVC) 혹은 가변진공축전기(Vacuum Variable Capacitor, VVC)를 사용하는 방식이다[3]. 그리고 ICP 안테나의 구조와 RF Generator의 구동주파수에 따라서 가변 인덕터 혹은 변압기를 필요에 따라 사용하고 있다. 특히 AVC나 VVC를 사용하는 경우에는 DSP등을 이용한 스텝 모터 제어를 통해 공정 환경에 따라서 자동으로 매칭 포인트를 찾아 축전기의 값을 조정하는 자동정합을 적용하고 있다[4].

한편으로 저주파 페라이트 ICP에서는 안테나와 플라즈마의 결합계수가 거의 1에 가깝고, 유도결합된 임피던스의 저항성분이 리액턴스 성분을 무시할 수 있을 정도로 크기 때문에 기존의 방식과 다르게 간단한 변압기 매칭을 이용할 수 있다. 기존의 변압기 매치방식은 수동으로 권선을 조정해야 하므로 입력전력이 증가함에 따라 같이 증가하는 Reflected Power를 줄이기 위해 RF Generator에서의 전력전달을 멈추고 플라즈마를 끈 다음 변압기의 권선을 조절한 후 다시 전력을 인가하여 플라즈마를 켜는 번거로운 방식이었다.

[†]E-mail : josclub@hanyang.ac.kr

본 논문에서는 고속의 릴레이 스위칭 회로를 이용하여 변압기 권선을 제어하는 방식을 적용하여 플라즈마가 유지되면서 동시에 임피던스 매칭을 할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 이 론

2.1. ICP에서의 임피던스 매칭

ICP는 Fig. 1과 같이 저항과 유도성 성분으로 모델링 할 수 있다[5]. ICP는 전력이나 공정압력에 따라 유도결합의 정도가 바뀌게 되고, 이에 따른 임피던스의 변화에 맞게 임피던스 매칭해야 한다.

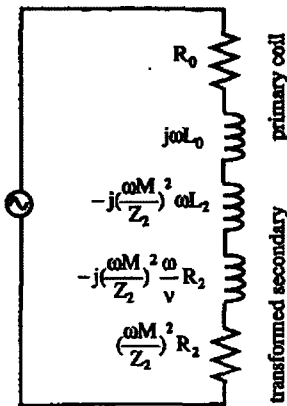


Fig. 1. Equivalent circuit of an inductively coupled discharge.

대부분의 RF Generator는 출력 임피던스가 산업기준 따라 50Ω에 맞추어져 있다[4]. 매칭 네트워크의 역할은 플라즈마와 안테나가 가지고 있는 저항성, 용량성 혹은 유도성 특징들을 50Ω으로 변환해 주는 것이다.

Fig. 2는 Fig. 1과 같은 ICP에 적용되는 매칭 네트워크의 개략적인 회로이다.

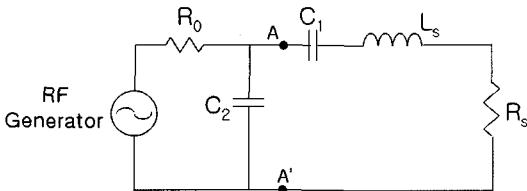


Fig. 3. Schematic of matching network for ICP.

R_s, L_s 는 안테나와 플라즈마의 유도결합으로 생긴 저항과 인덕턴스, R_0 는 RF Generator의 출력임피던스이고 C_1, C_2 는 매칭 네트워크에 사용되는 축전기이다.

A-A' 우측의 어드미턴스는,

$$Y_A \equiv G_A + jB_A = \frac{1}{R_S + j(X_1 + X_S)} \quad (1)$$

G_A : 컨덕턴스 B_A : 서셉턴스

X_1 : C_1 의 리액턴스 X_S : L_S 의 리액턴스

로 나타낼 수 있다.

여기서 임피던스 매칭이 이루어 지려면,

$$G_A = \frac{1}{R_0} \quad B_A = \omega C_2 \quad (2)$$

와 같은 임피던스 매칭 조건을 만족 해야 한다. 즉, 가변축전기 C_1, C_2 를 이용하여 임피던스 매칭을 하는 방식이다[3].

2.2. 페라이트 ICP에서의 변압기 임피던스 매칭

페라이트ICP는 안테나와 플라즈마의 유도결합이 뛰어나기 때문에 변압기 임피던스 매칭을 사용할 수 있다.

Fig. 2는 개략적인 변압기 임피던스 정합의 모습이다. 부하의 임피던스는 권선비의 제곱에 비례하여 변환된다 [6].

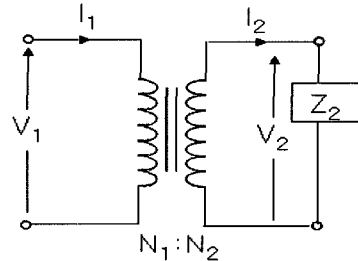


Fig. 2. Ideal transformer.

$$Z_1 = \frac{1}{a^2} Z_2 = Z_2 \quad a = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

a : 1차측에 감긴 권선과 2차측에 감긴 권선의 비 Z_1 : 1차측의 임피던스 Z_2 : 2차측의 임피던스

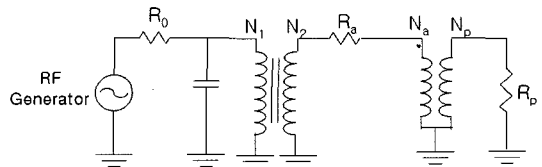


Fig. 3. Schematic of transformer matching for ICP.

이것을 페라이트ICP에 적용한 것이 Fig. 3이다. Fig. 3에서 R_p 는 플라즈마가 가지는 저항성분이고 R_a 는 안테나가 가지는 저항성분이다. N_a 와 N_p 로 표시된 부분은 안테나와 플라즈마의 유도결합을 나타낸 부분이다.

이 부분의 합성저항을 안테나 측에서 바라본다면 식(1)에 의해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_L = R_a + a^2 R_p \tag{4}$$

a': 안테나와 플라즈마의 유도결합 권선비

R_L: 유도결합 플라즈마의 저항

여기서 RF Generator의 출력 임피던스를 R₀라 하면, N₁, N₂로 표시되는 변압기를 사용하여

$$R_0 = a^2 R_L \tag{5}$$

이와 같은 임피던스 매칭 조건을 만들 수 있다. 위 식에서 플라즈마 조건에 따라 변하는 것은 R_p이고 a'와 R_a는 변하지 않으므로 a를 조절할 수 있다면 임피던스 매칭이 가능하다.

이러한 변압기 임피던스 매칭은 간단한 매칭 방법으로 특히 1 MHz이하의 주파수에서는 가장 적합하게 응용되고 있다.

3. 실험방법

3.1. 페라이트 ICP의 구성

페라이트 ICP는 페라이트의 높은 상대투자율에 의해 유도되는 전기장을 이용하기 위해 기존 ICP 시스템에 페라이트를 응용한 ICP이다.

페라이트에 코일을 감는 방식에 따라 유도되는 전기장과 자기장의 방향이 바뀌는데, 이는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 페라이트에 안테나 코일을 감은 형태이고 Fig. 4(b)는 페라이트와 동심원 형태의 안테나 위에 페라이트를 올려놓은 형태이다. Fig. 4(a)의 경우 유도되는 전기장은 페라이트 내부 원을 통과하는 방향이고, Fig. 4(b)의 경우 페라이트와 동심원 형태로 전기장이 유도된다[7].

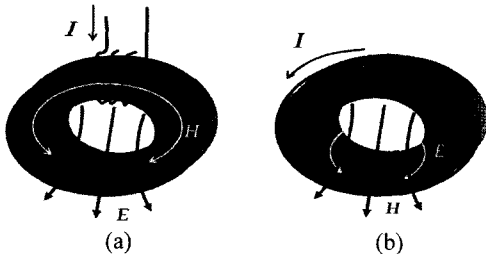


Fig. 4. the electric field and magnetic field distribution.

3.2. 변압기 매칭 네트워크

변압기 매칭 네트워크는 변압기와 고정세라믹 축전

기로 이루어져 있다. 플라즈마 공정에서 안테나와 플라즈마의 임피던스는 전력과 공정압력에 대하여 변화하므로 매칭 네트워크도 연속적으로 동작할 수 있어야 한다. 개략적인 구성을 Fig. 5에 나타내었다.

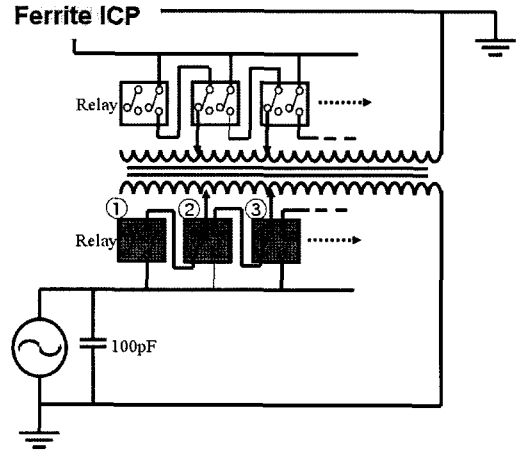


Fig. 5. The schematic of the transformer matching network.

플라즈마를 유지시키기 위해서는 출력부의 전압강하를 방지하기 위해 오직 하나의 릴레이에만 전력이 전달될 수 있도록 설계되어야 한다.

Fig. 5의 회로는 2-채널 릴레이를 사용하여 변압기 권선제어를 위해서 릴레이를 켜는 순간, 이전에 결선된 부분을 개방 상태로 만들면서 동시에 해당되는 권선에 전력이 전달될 수 있게 설계되었다. ①의 릴레이를 켜면 스위치는 도통되면서 ②의 릴레이를 통과하여 변압기의 1차측으로 전력을 전달 할 수 있다. 변압기의 권선비를 바꾸기 위하여 ②의 릴레이를 켜면 ①의 릴레이로 전달되던 전력은 ②릴레이의 왼쪽 스위치의 개방에 의해서 전달되던 권선으로 전달되지 않게 된다. 동시에 ②의 릴레이의 오른쪽 스위치의 단락으로 인해서 전력은 ③의 릴레이의 왼쪽 스위치를 통하여 전달되게 된다. 이러한 스위칭 시스템은 전력의 전달과 멈춤을 동시에 행하면서 변압기 권선을 효과적으로 바꿀 수 있다는 장점이 있다.

릴레이는 전용소켓에 연결하여 손상이 발생했을 경우 교체가 쉽도록 하였다. 변압기에 사용된 코어는 페라이트 ICP에 사용된 페라이트와 자기적 특성과 주파수 특성이 같은 것을 사용하였다. 코어에 감은 전선은 10A의 전류를 흘릴 수 있는 연선을 사용하였고 1차측과 2차측에 각각 22번씩 감았다. 그리고 18개의 탭을 만들어 릴레이와 연결할 수 있도록 제작 하였다. 플라즈마와 안테나의 유도결합이 충분하지 않을 때에 임피

던스에 생길 것으로 예상되는 유도성분에 대비하여 RF Generator와 변압기 사이에 100 pF의 고정형 세라믹 축전기를 병렬연결 하였다[8].

3.3. 실험장치

페라이트 ICP와 디지털 매칭 네트워크를 결합한 실험장치의 개략적인 모습을 Fig. 6에 나타내었다.

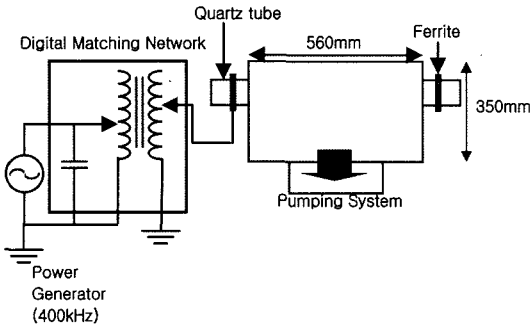


Fig. 6. The schematic of the experimental setup.

챔버는 지름 560 mm, 높이 350 mm로 제작되었다. 챔버의 옆 부분으로 가스가 주입되며 아래 부분으로 가스의 배기가 이루어 진다. 로터리 오일 펌프(Rotary Oil Pump)로 먼저 배기하고 터보 분자펌프(Turbo Molecular Pump)로 고진공 상태를 유지한다. 가스는 아르곤(Argon)을 사용하였고 질량유량계(Mass Flow Controller, MFC)를 이용하여 가스의 주입량을 조절한다. 400 kHz의 RF Generator를 사용하여 전력을 공급하고 챔버와 RF Generator 사이에 매칭 네트워크를 연결하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 변압기 임피던스 매치의 동작

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 매칭 네트워크에 정현파를 인가하고 권선비 변환을 위해 릴레이를 켜를 때 변압기 2차측 출력의 변화를 오실로스코프로 측정 한 것이다. Fig. 5의 회로와 같이 2-채널 릴레이를 사용하여 한 개의 릴레이에서 결선의 개방과 단락을 동시에 하기 때문에 스위칭 순간에 신호가 끊어지지 않고 계속 유지될 수 있었다.

하지만 스위칭을 하는 순간 기존 출력의 2배에 달하는 출력이 순간적으로 나타났다. 이런 현상은 스위치가 단락 되는 순간에 아크나 또 다른 과도현상에 의해 생기는 큰 전압이 2차측에 출력되는 것으로 여겨진다. 이러한 현상으로 플라즈마 발생을 유지할 수 있었지만

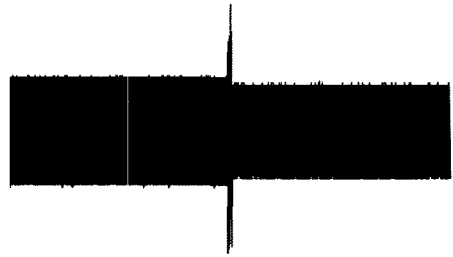


Fig. 6. The output signal when relay is turned on.

큰 출력전압으로 인하여 플라즈마가 갑자기 밝아지는 현상을 볼 수 있었다, 짧은 순간이라 큰 변화를 관찰할 수는 없었지만 더 큰 전력을 인가하면 플라즈마에 영향을 줄 수 있을것으로 예상되므로 차후 개선해 나가야 할 점으로 생각된다.

4.2. 페라이트 ICP의 적용

5 mTorr, 10 mTorr의 압력과 150W~2000W의 전력에서 변화하는 플라즈마 환경에 대한 변압기의 권선비를 조사하였다.

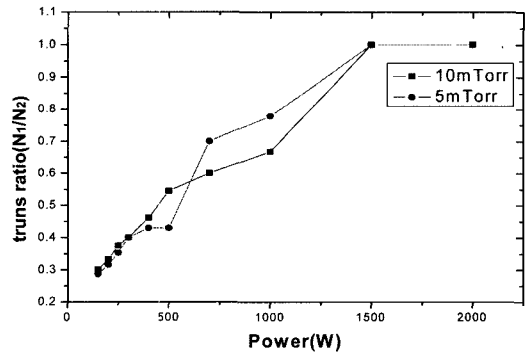


Fig. 7. The turns ratio of Transformer.

Fig. 7에서 전력이 커지면서 권선비가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 전력이 높아지면서 안테나와 플라즈마의 유도결합의 정도에 의한 저항성분의 감소로 권선비 a가 식(5)에 의해서 커지는 것이다.

저주파에서 사용되는 만큼 안테나에 걸리는 전압과 전류 사이의 위상 차에 의한 Reflected Power의 발생은 그리 크지 않다. 그리고 안테나가 가질 수 있는 손실인 코어의 손실과 코어에 감은 코일의 손실을 줄이기 위하여 낮은 저항을 가진 코일과 적절한 주파수 특성과 자속특성을 가진 자성체를 사용하였다. 그리하여 손실을 측정 한 결과 모든 인가전력과 공정압력의 범위에서 12~30W으로 매우 낮게 측정 되었다[8].

무시할 수 있는 위상차이에 의한 손실과 안테나 손실에도 불구하고 Fig. 8과 같이 전달하려는 전력이 증가함에 따라 Forward Power에 대한 Reflected Power의 비가 점점 증가하는 것을 관찰 하였다. 이는 전력이 커지면서(1000W 이상) 실험 장치에 설계된 페라이트 ICP안테나의 임피던스 특성에 따라 발생하는 전자관성에 의한 인덕턴스의 변화로 인해 안테나와 플라즈마가 가지는 리액턴스의 특성이 바뀌게 된다[8].

하지만 매칭 네트워크에 연결된 병렬 축전기가 100pF으로 고정되어 있어서 위상 차 발생에 의한 임피던스 내의 복소성분을 보정하지 못하는 것으로 생각된다. 보다 효율적인 임피던스 매칭을 위해서는 복소성분 감소를 위한 적절한 소자의 선택과 회로 구성이 필요하다.

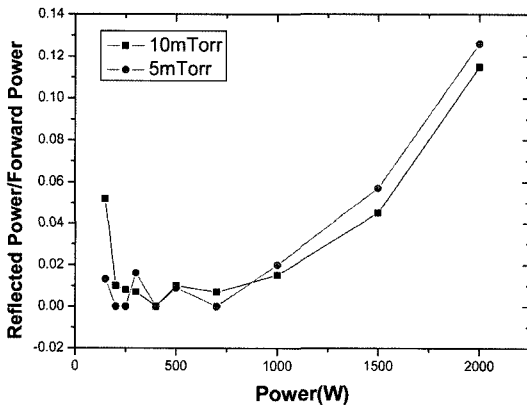


Fig. 8. The ratio of reflected power and forward power.

5. 결 론

페라이트 ICP에 적용한 변압기 매칭 네트워크는 기존의 수동으로 권선을 조절하는 매칭 시스템에 비하여 간편하게 제작하고 빠르고 정확하게 구동할 수 있었다. 그리고 2-채널 릴레이를 이용하여 새로이 설계된 변압기 권선 제어회로를 사용할 때 플라즈마가 유지되면서 임피던스 매칭을 할 수 있었다. 150~1000W의 범위에서 Reflected power를 무시해도 좋을 만큼 정확하고 넓은 범위의 임피던스 정합을 보여주었지만 그 이상의

전력에서는 Forward power에 비해 Reflected power가 점점 증가해서 효과적으로 임피던스 매칭이 이루어지지 않았다.

Fig. 5에서의 고정 세라믹 축전기를 가변진공축전기 혹은 다른 소자로 바꾸고 변압기 권선을 더 효율적으로 감는다면 더 높은 전력에서도 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 Phase-Magnitude Detector (PMD)와 마이크로 콘트롤러(Microcontroller)를 이용하면 고속의 자동 매칭도 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 시스템 IC 2010 과 산업자원부 신기술 실용화 과제 지원을 받아 행하였습니다.

참고문헌

1. Alfred Grill, 정진욱 옮김, 공정 플라즈마 기초와 응용, 청문각, 2003.
2. V. A. Godyak and C. W. Chung. "Distributed Ferromagnetic Inductively Coupled Plasma as an Alternative Plasma Processing Tool" Japanese Journal of Applied Phys, 45, 8035(2006).
3. M. A. Liebermann and A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, 2nd edition. Wiley, New York, 1994.
4. Louis E. Frenzel, Jr., RF Power for Industrial Applications. Pearson Prentice Hall, New Jersey 2004.
5. R B Piejak, V A Godyak and B M Alexandrovich "A simple analysis of an inductive RF discharge." Plasma Source Sci. Technol., 1(1992) pp.179-186.
6. Paresh C. Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2nd edition. Wiley, New York, 1997.
7. 이원기, 이경효, 정진욱. "13.56 MHz유도 결합 플라즈마에서의 강자성체 페라이트 코어의 효과", 반도체 및 디스플레이장비학회지, 제4권, 제3호, pp. 35-38, 2005.
8. K. H. Lee, Y. K. Lee, S. W. Cho and C. W. Chung, "Electrical and plasma parameters of side type ferromagnetic ICP", Gases Electronics Conference 59th (2006, U.S.).