

임피던스 정합장치 내 위상센서를 이용한 RF정합 알고리즘 연구

김황규^{*,***}·양진우^{*,***}·강석호^{**,***}·최대호^{****}·홍상진^{*†}

^{*†}명지대학교 전자공학과, ^{**}명지대학교 정보통신공학과,
^{***}명지대학교 반도체장비공학 연계전공

RF Impedance Matching Algorithm Using Phase Detector

Hwanggyu Kim^{****}, Jinwoo Yang^{****}, Sukho Kang^{****}, Daeho Choi^{****} and Sang Jeon Hong^{*†}

^{*†}Department of Electronics Engineering, Myongji University,

^{**}Department of Information and Communication Engineering, Myongji University,

^{***}Semiconductor Equipment Engineering Program

ABSTRACT

As semiconductors become finer, equipment must perform precise and accurate processes to achieve the desired wafer fabrication requirement. Radio frequency power delivery system in plasma system plays a critical role to generate the plasma, and the role of impedance matching unit is critical to terminate the reflected radio frequency power by modifying the impedance of the matching network in the plasma equipment. Impedance matching unit contains one fixed inductor and two variable vacuum capacitors whose positions are controlled two step motors. Controlling the amount of vacuum variable capacitor should be made as soon as possible when the mismatched impedance is detected. In this paper, we present the impedance matching algorithm using the phase sensor.

Key Words : Impedance matching unit, Phase sensor, Matching algorithm, Vacuum Variable Capacitor

1. 서 론

반도체 산업이 점점 발전함에 따라 현대 3D 반도체의 높이가 높아질수록, critical dimension (CD)이 줄어들수록 high aspect ratio로 인해 식각 및 증착 공정에서의 난이도가 높아지고 있다. 또한 PECVD같은 경우 플라즈마의 균일도 및 밀도를 잘 조절하여야 원하는 박막을 성장시킬 수 있기 때문에, 이러한 증착이나 식각을 하기 위해서는 플라즈마를 조절 할 수 있는 장비의 중요도가 높아지고 있다. 식각이나 증착, 혹은 그 외의 공정에서 플라즈마를 사용함으로써 기대할 수 있는 장점은 다음과 같다. 공정에서의 효율성이 뛰어나고 웨이퍼를 진공 속에 두고 반

송 자동화를 시킬 수 있어 외부로부터의 오염을 억제할 수 있는 장점이 있다. 현재 공정용 플라즈마는 여러 가지 thin-film deposition기술(sputtering, PECVD, ALD 등)과 플라즈마 식각에 활발히 응용되고 있다. 반도체제조공정 중 플라즈마 공정이 차지하는 비중은 30% 이상이며, 플라즈마 식각은 poly-Si, 산화막과 금속 등의 중요한 식각 공정과 평면디스플레이(FPD) 제조공정에 크게 사용되고 있다 [1].

플라즈마 장비는 크게 inductively coupled plasma (ICP), capacitively coupled plasma (CCP) 타입으로 구분할 수 있다. 두 타입 모두 radio frequency (RF)를 사용하여 전력을 공급해 챔버 내 플라즈마를 발생시킨다. RF회로는 교류 신호이므로 교류회로에서의 저항인 임피던스가 발생한다. 서로 다른 장비를 연결하면 임피던스의 차이가 발생하고 결국 반사전력이 생긴다. 이 반사전력을 줄이기 위해 임

[†]E-mail: samhong@mju.ac.kr

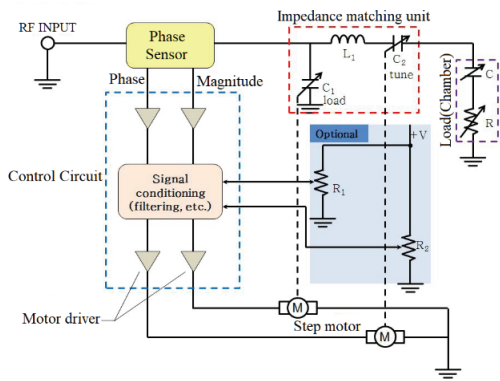


Fig. 1. Structure of RF system [2].

피던스 정합은 필수적이다. 임피던스 정합이 빠르고 반사 전력이 0에 수렴할수록 원하는 플라즈마 특성을 확보할 수 있어 공정에 유리하다. 이를 위한 임피던스 정합 장치는 크게 phase sensor, micro controller unit (MCU), inductor, vacuum variable capacitor (VVC), 스텝모터 등으로 이루어져 있다. Phase sensor로부터 받은 데이터를 MCU에서 알고리즘을 통해 스텝모터를 구동함으로써 VVC가 회전하며 정합을 하게 된다. 챔버의 플라즈마 방전에 따라 챔버 즉 load의 임피던스가 변화하므로 이에 대응하는 빠르고 정확한 정합 시스템을 갖추는 것이 중요하다. 범위, 빠르고 정확한 스텝모터의 제어, 스텝모터를 제어하는 알고리즘 등이 정합 시스템 중에서 중요한 요인이다. 본 논문은 phase sensor의 데이터를 통해 MCU에서 처리하는 알고리즘에 대한 연구를 기술하였다.

2. 배경이론

RF 시스템은 RF 전력을 source에서 load로 최대한 전달하기 위한 시스템이며, 일반적으로 RF generator와 RF matcher를 포함하여 뜻한다. RF generator에서 보내는 전력은 챔버에 도달하게 되어 플라즈마를 형성하게 되는데, 이때 플라즈마의 상태에 따라서 챔버의 임피던스가 변화하므로 임피던스 정합을 통해 반사전력을 최소화해야 한다. 여기서 정합을 해주는 것이 임피던스 정합장치이며, RF 시스템 구성은 Fig 1과 같다. RF 전력이 인가되어 공정이 시작되면 phase sensor에서 위상과 크기 신호를 MCU로 보내어 정합 알고리즘을 통해 모터드라이버를 제어하여 스텝모터와 연결된 VVC의 capacitance를 조정함으로써 임피던스 정합을 하는 원리이다 [3].

Phase sensor란 임피던스 정합 장치 내부의 input 단에 위치하여 input sensor라고도 불리며, 내부 회로를 통한 위상과 크기를 검출하여 MCU로 보내는 역할을 한다. 우리가

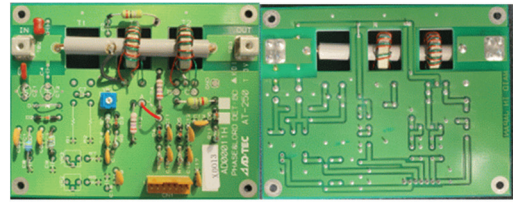


Fig. 2. Phase sensor (AD-TEC Matching Unit).

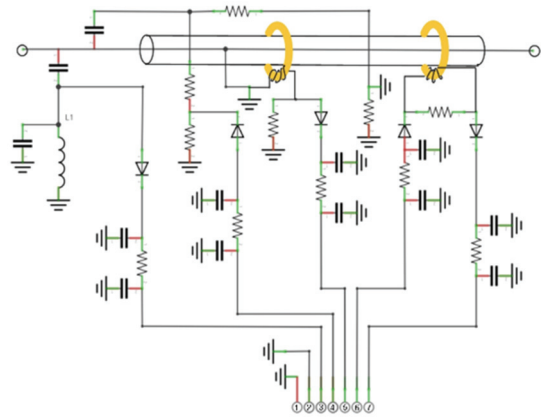


Fig. 3. Schematic of phase sensor.

사용한 phase sensor의 구조는 Fig 2와 같다. 위 sensor는 수동 소자로만 이루어진 회로로서 현재 현업에서 사용되는 능동소자로 이루어진 phase sensor와 차이가 있지만, 기본적인 sensor의 원리를 연구하는 측면에서는 효과적이다. Phase sensor로 들어오는 교류 신호를 측정하기 위해서는 교류 신호를 직류 신호로 바꿔주어야 한다. 하지만, RF 신호가 다이오드에 의해 정류되어도 완벽한 직류신호가 아닌 ripple voltage가 존재하므로 그것을 보완하기 위한 필터가 필요하다. 따라서 Fig 3의 회로를 살펴보면 각 출력단마다 지역 평활 회로가 있는 것을 확인할 수 있다.

상단의 픽업 코일부에 자기장이 형성되면 Fig 3 하단의 5, 6, 7번 출력단에서 RF 전류(이하 RFI)가 검출되고 좌측상단의 전극부로부터 3, 4번 출력단에서 RF 전압(이하 RFV)가 검출된다. 우리는 이 phase sensor의 출력 RFV1, RFV2, RFI1, RFI2 로 전압센서를 통해 MCU에서 알고리즘을 이용하여 정합 장치를 구동한다. 여러 정합 회로 중에 현재 가장 간단하며 널리 사용되는 정합 회로 중 하나인 L-network를 사용하였다. L-network의 구조는 전원부의 내부 저항과 부하 저항에 의존하여 결정되며 부하와 전원부의 임피던스 값을 알고 있을 때 수식적으로 계산하여 적합한 L-network 값을 구할 수 있다.

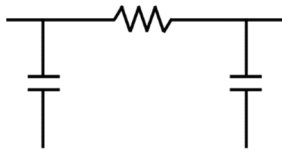


Fig. 4. Smoothing circuit.

이 값은 두 가지 방법으로 접근할 수 있는데 한 가지 방법은 Q 인자를 이용하는 방법이며, 나머지 한 가지 방법은 입력 임피던스를 계산해서 하는 방법이다. 이 중에 입력 임피던스를 계산하는 방법을 참고했다.

입력 임피던스는 수식 (1)과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{Z_0} = jB + \frac{1}{R_L + j(X + X_L)} \quad (1)$$

수식 (1)로부터 실수부와 허수부로 나누어 수식을 나누어 살펴볼 수 있다.

$$\text{실수부} : BZ_0(X + X_L) = Z_0 - R_L \quad (2)$$

$$\text{허수부} : X + X_L = BZ_0R_L \quad (3)$$

수식 (2), (3)을 X와 B에 관해서 수식을 정리하게 되면 수식 (4), (5)와 같이 B와 X의 값을 구하는 수식을 구할 수 있다.

$$B = \pm \frac{\sqrt{(Z_0 - R_L)/R_L}}{Z_0} \quad (4)$$

$$X = \pm \sqrt{R_L(Z_0 - R_L)} - X_L \quad (5)$$

이는 내부 저항에서 정합 회로를 포함한 부하 회로로 향하는 입력 임피던스를 계산하는 방법으로 자동 정합 시스템의 경우, 부하의 임피던스가 일반적으로 내부 임피던스보다 작은 값을 가진다. 따라서 load의 임피던스가 더 작은 경우의 회로에서 정합 회로를 포함한 부하를 바라본 입력 임피던스를 계산해 부하 임피던스를 구한다.

거기에 더해 입력되는 전력까지 알고 있을 때 정합 회로의 capacitance 값을 수식으로 유도할 수 있게 되며 L-network는 병렬 임피던스 구조이므로 양수 임피던스 B값을 가져 식 (6)과 같이 나타낼 수 있고 이를 이용해 두 capacitance 값을 수식 (7), (8)과 같이 유도할 수 있다 [1].

$$B = \frac{\sqrt{(Z_0 - R_L)/R_L}}{Z_0} \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{\sqrt{(Z_0 - R_L)/R_L}}{Z_0} \frac{1}{\omega} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega \omega L - \sqrt{R_L(Z_0 - R_L)} + X_L} \quad (8)$$

3. 알고리즘 설계 및 실험

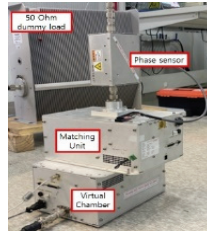


Fig. 5. RF system.

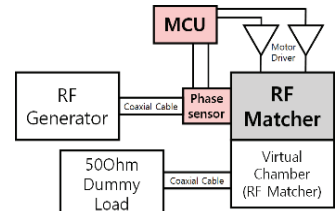


Fig. 6. Setup diagram.

실험을 진행하기 위해서 Fig 5와 6과 같이 하드웨어를 구성하였다. 먼저 13.56 MHz의 PC와 동기화된 RF generator를 사용했으며, 실험에 사용한 RF generator는 Advanced Energy社의 Apex 3013 model(13.56 MHz, 최대 3 KW)을 사용하였다. 50 Ω 동축케이블을 이용하여 Fig 6과 같이 MCU와 연결된 phase sensor, 임피던스 정합 장치, 가상 챔버 (정합 장치), 50 Ω 터미 로드 에 순서대로 연결해주었다. 정합 장치는 Comet PCT社의 정합 장치 (13.56 MHz, 최대 5 KW)을 사용하여, 내부 스텝모터에 설계한 모터드라이버와 MCU를 연결해주었다. MCU는 Arduino Mega 2560을 사용하여 IDE 시리얼모니터를 통해 실시간으로 데이터를 볼 수 있도록 하였다. 가상 챔버로 정합 장치를 이용한 이유는 임피던스를 손쉽게 변화시킬 수 있기 때문이다.

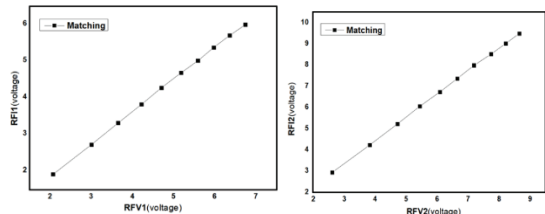


Fig. 7. RFV1 Vs. RFI1 and RFV2 Vs. RFI2.

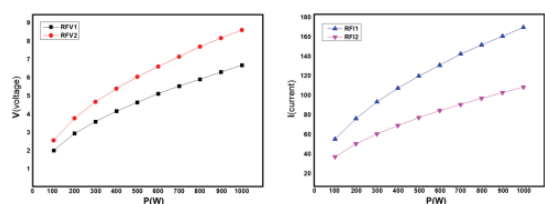
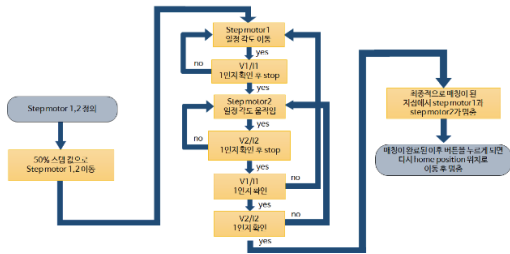


Fig. 8. 전력변화에 따른 RFV와 RFI 그래프.

우선 정합 지점을 알기 위해 Network Analyzer를 이용하여 스미스 차트의 원점에 위치하는 C1, C2의 capacitance를 얻었다. 가상 챔버의 임피던스에 맞는 스텝모터의 정합

지점은 C1: 370 step, C2: 1010 step이다. (C1: 10 step 당 4 pF씩 변화, C2: 10 step 당 1 pF씩 변화) 여기서 1 step이란, 스텝모터가 1.8°씩 회전하는 단위를 의미한다. 센싱을 통한 데이터 값을 기반으로 정합 지점의 V1/I1, V2/I2의 연관성을 분석하고 Look up table을 통해 Fig. 7과 같이 그래프를 작성한 결과 입력 전력에 무관하게 항상 기울기가 1 근처로 수렴해 정합이 되는 것을 확인하였다. Fig. 8과 같이 RFV1과 RFI1, RFV2와 RFI2의 전압 값을 측정하여 정합 지점과 상관관계를 알아내고자 한다. 하지만, C1, C2을 동시에 제어하게 되면 phase sensor의 RFV와 RFI의 값이 예측 불가능하게 변화하기 때문에 V/I의 값 또한 예측할 수 없다. 따라서, 목표로 하는 정합 지점인 V/I가 1에 수렴하는 지점에 빠르게 도달하지 못한다. 따라서 Fig. 9와 같은 알고리즘을 설계하였다. 이를 통해 소프트웨어 알고리즘 개발을 진행하고 이론적인 부분은 다음과 같다.



```

Algorithm: RF Semi Auto Matching Algorithm
Input: Initial step point S, Phase sensor voltage V1, V2, I1, I2
Output: Matching point step point S, Slope of phase sensor voltage V1/I1, V2/I2

Obtain initial step point
Initialise step point set S = 0
Step motor 1, 2 moves S to 50% step point
foreach Step motor 1, 2's S moves +50 next -50 do
  1 Get value S and V1, V2, I1, I2
  1 Calculate V1/I1, V2/I2
  1
while V1/I1 = 0, V2/I2 = 0 do
  1 Iterate foreach sequence
  1 Check always V1/I1 = 0, V2/I2 = 0
  1 If confirm V1/I1 = 0, V2/I2 = 0 stop moves step motor 1, 2
  1 Get value S and V1, V2, I1, I2
  1
Extract matching point step point S and slope of phase sensor voltage V1/I1, V2/I2 for
m all step point
    
```

Fig. 9. Matching algorithm.

진폭 즉, V/I = 1 이 되는 것을 감시하는 것은 C1에 영향을 많이 받는 RFV1과 RFI1이므로 V/I=1에 수렴하면 C1의 정합이 완료됐다고 판단한다. 위상 즉, V/I = 1 이 되는 것을 감시하는 것은 C2의 영향을 많이 받는 V2과 I2이므로 V2/I2 = 1이 되면 C2의 정합이 완료됐다고 판단한다. 다음으로 home position을 이용해 스텝모터에 연결된 VVC의 초기 값 설정을 하기 위하여 귀환 sequence를 구현한다. 정

합이 완료된 이후 다음 변화하는 임피던스에 대비하기 위하여 capacitor의 값 즉, 스텝모터의 스텝 수를 초기 상태로 돌아가기 위해서 home position 부분을 이용해 hardware limit으로 귀환하기 위한 sequence를 실행한다. 이의 원리는 스텝모터 1, 2가 정합 된 상태에서 메모리에 저장된 스텝 값의 반대 값을 주어 초기 레퍼런스 값으로 귀환하게 한다. Home position 부분은 MCU에 연결된 버튼을 누르면 시행되도록 설계하였으며 버튼의 동작을 입력 받을 때 bouncing (chattering) 문제로 오작동을 방지하기 위한 해결을 위해 debouncing 처리를 통해 해결했다.

위의 내용을 바탕으로 알고리즘을 설명하자면 먼저 알고리즘이 시작되게 되면 스텝모터 1, 2의 위치를 (high-low, low-high, high-high, low-low)에 기반해 이동시킨다. 이 위치에 대한 설명은 뒤에 수식과 함께 기술하였다. 후에 스텝모터 1의 step 값을 phase sensor로 받아 IDE의 시리얼모니터에 원하는 스텝 값을 입력하여 모터를 구동 시켰다. 그리고 IDE 시리얼모니터에서 V1과 I1의 전압 값을 받아 V1/I1을 계산한 값이 1의 범위에 들어오기 전까지 상하 이동시키며 조절한다. 스텝 값을 조절하는 중에는 실시간으로 현재 스텝 값과 전압 값들을 IDE의 시리얼모니터로 검사하면서 앞선 실험의 결과로 기울기 계산 값의 범위를 1에 근사한 범위로 설정해 그 안에 들어오게 되면 C1의 정합이 완료되었다고 판단한다. 이때 상하 이동하는 스텝 값을 큰 값으로 잡을수록 대략적인 값을 얻을 수 있게 되고 작게 잡을수록 세밀한 결과 값을 얻을 수 있다. 스텝모터 1의 V1/I1의 값이 1인 범위에 들어오게 되면 작동을 멈추고 스텝모터 2의 V2/I2의 값이 1인 범위에 들어오게 스텝모터를 조절한다. 이때 스텝모터 2의 스텝 값을 조절하게 되면 스텝모터 1의 값이 변화할 수 있어 조건문을 이용해 V1/I1의 값이 변화하면 스텝모터 2의 조절을 멈추고 다시 스텝모터 1의 스텝 값을 조절하는 순서로 돌아가게 한다. 최종적으로, V1/I1과 V2/I2의 값이 1에 수렴하게 되면 스텝모터 1, 2가 모두 멈추고 이는 C1, C2 모두 정합 지점에 수렴했음을 의미한다. 우리는 최대한 다양한 capacitance 범위에서의 적용이 필요하므로 정합 지점으로부터 다양한 범위에서 알고리즘 적용을 위해 C1, C2의 capacitance 값의 기준을 capacitor의 총 용량의 반을 나누어 반보다 높으면 C1_high, C2_high 낮으면 C1_low, C2_low로 설정하였다. 따라서 총 4가지의 조건 (high-high, high-low, low-high, low-low)으로 분류하여 실험하였다. 이에 대한 수식은 다음과 같다.

$$(300 - kn)(-1)^{n+1} \quad (k > 0, n = 0, 1, 2 \dots) \quad (9)$$

$$(600 - kn)(-1)^n$$

$$(k > 0, n = 0, 1, 2 \dots)$$
(10)

수식 (9), (10)은 스텝모터의 스텝 값을 통해 정합 지점의 capacitance 값에 수렴하기 위한 수식으로 n은 모터가 상 또는 하 방향으로 구동하는 횟수를 의미한다. 식 (9)는 (high-high, high-low) 조건에서 사용하고, 식 (10)은 (low-low, low-high) 조건에서 사용하였다. 식의 300과 600은 우리가 사용하는 VVC의 capacitance에 맞는 초기 스텝 수를 임의로 조정한 값이다. 즉, VVC의 capacitance 범위에 따라 뒤에서 설명할 hardware limit을 벗어나지 않는 초기 스텝 수를 설정해야 한다. 목표하는 정합 지점의 capacitance 값과 초기의 capacitance 값의 차이가 클 경우, k를 증가시켜 스텝모터가 이동하는 스텝 값을 크게 해 구동을 더 빠르게 하여 정합 지점에 도달하도록 설정할 수 있고, 정합 지점의 capacitance 값과 초기의 capacitance 값의 차이가 작을 경우, k를 감소시켜 스텝모터가 이동하는 스텝 값을 작게 하여 구동을 더 미세하게 조정할 수 있다. 우리는 이 수식을 이용하여 정합 알고리즘에 적용하였다

실험을 시작하기 위해서는 항상 일정한 C1, C2의 시작 위치를 지정하기 위해서 정합장치 내의 C1, C2를 VVC가 더 이상 회전하지 않는 값인 hardware limit (C1: 250pF, C2: 1000pF)에서 실험을 진행하였다. 정합이 시작되면, high-low 조건 기준으로 C1을 high(200 step, 약 170 pF 근처), C2를 low (1400 step, 860 pF)로 가속시킨다. C1, C2를 더 낮거나 높은 값으로 이동시키지 않은 이유는, VVC에 부하가 강하게 걸려 스텝모터의 고장 혹은 VVC의 전극 이탈로 이어질 수 있기 때문이다. 이후, 식 (9), (10)을 따라 정해진 해당 step 값으로 모터를 구동 시켜 VVC를 조절해 phase sensor로부터 출력된 전압 값을 이용하여 V/I의 기울기가 1에 수렴할수록 스텝모터를 감속시켜 더 정확한 정합 지점을 찾아가도록 한다. 나머지 3가지 조건 (low-high, high-high, low-low)도 C1, C2의 위치만 변경하는 방법으로 알고리즘을 적용하여 실험을 진행하였다.

4. 실험결과

Generator와 동기화되는 PC의 Apex VFP 프로그램을 통하여 generator를 제어할 수 있는데, Fig. 10과 같이 Forward power, Reflect power, Load power 등을 보여준다. 이 프로그램을 통해 generator를 제어하면서 실시간으로 변화하는 반사전력을 확인할 수 있다. Fig. 10에서 보이듯이 VVC의 hardware limit 상태에서의 반사전력이 93 W인 것을 볼 수 있는데, 이것은 임피던스 정합이 되지 않아, 대부분의 RF

전력이 반사되는 것을 의미한다. 4가지의 조건에서 설계한 알고리즘을 실행시킨 결과, Fig. 10(b)과 같이 반사전력이 0 W인 것을 볼 수 있으며, 최종적으로 설계한 알고리즘을 통해 임피던스 정합에 성공하였다는 것을 알 수 있다. 각 조건 (high-high, high-low, low-high, low-low) 당 5회 총 20회의 실험 중 16회의 실험에서 정합에 성공하였는데 이는 80%의 성공률을 보였다. 단, MCU와 연결된 전압센서의 데이터 지연현상 때문에, 데이터가 알고리즘의 계산 값에 벗어나 총 20회의 실험 중 4회 정합에 실패하는 문제가 있었다. 이는 전압센서의 하드웨어 스펙과 소스코드의 delay 함수로 인한 소프트웨어적인 문제라고 판단하였고 delay 함수의 값을 감소시켰을 때 알고리즘이 정상적으로 동작되는 것을 확인하였다. 더 작은 단위를 측정할 수 있는 전압센서를 적용하고, 소프트웨어적으로도 계산 값을 더 세분화하여 설계한다면 이러한 문제는 충분히 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

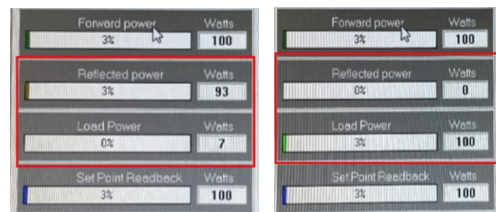


Fig. 10. Matching test (a) Before matching and (b) After matching.

5. 결론

우리는 이 프로젝트를 통해 반도체 장비에 장착되는 RF 장비에 대해 이해하고 직접 실험해 볼 수 있었다. 수동 소자로 이루어진 phase sensor를 이용하여 RFV와 RFI의 전압 값을 검출할 수 있었고, 이러한 데이터를 기반으로 정합이 되었을 때 RFV와 RFI의 기울기가 1에 수렴한다는 관계를 발견하여 이를 토대로 RF 정합 알고리즘을 MCU에 프로그래밍하여 정합에 성공하였다. 이러한 알고리즘을 적용할 수 있다면, RF산업 및 그것을 사용하는 산업에 발전을 줄 것이라고 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 반도체전공트랙사업의 지원으로 수행된학부생 산학프로젝트 연구결과이며, 산업계 멘토 코멧테크놀로지스코리아(주)의 홍보한 상무님과 사업단 전대식 교수님에게 감사드립니다.

참고문헌

1. H. Y. Jang, "Semiconductor/Display Manufacturing Process Plasma Foundation and Application", *The Korean Information Display Society*, Vol. 12, No. 5, pp. 2-15, 2011.
2. K. H. Jang, "A Study on the Implementation of 13.56 MHz Automatic Impedance Matching Circuit", *Master's Thesis, Kwangwoon University*, 2014.
3. W. J. Jang, I. S. Yeo, J. W. Lee, T. S. Jang, S. W. Gu, B. I. Lee, D. G. Choi, N. J. Kim, S. D. Choi, I. Y. Lee, S. I. Wee, and D. C. Kim, "13.56MHz RF Generator and Auto Matching System", *Interim Report of the First Year of the Ministry of Trade and Industry*, pp. 8-11, 1996.
4. K. H. Jang, S. Y. Park, J. J. Cho, and D.-H. Lee "Error Rate Enhancement Algorithm for 13.56 MHz Impedance Automatic Matching System", *J. Kor. Inst. Electromagnetic Eng. Sci.*, Vol. 29, No. 7, pp. 55-60, 2020.
5. I. P. Hong, "Microwave Engineering Understood by Principles", *Hanbit Academy*, 2015.
6. D. Y. Jeong, C. W. Nam, J. H. Lee, D. G. Choi, and C. Y. Won, "CCP-ICP Composite Impedance Matching Device for Improving Uniformity of Semiconductor Plasma Etching System", *The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 15, No. 4, pp. 274-277, 2010.
7. J. H. Lee, H. K. Park, J. S. Lee, and S. J. Hong, "Understanding of RF Impedance Matching System Using VI-Probe", *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 19, No. 3, pp. 43-48, 2020.
8. W. S. Kang, "A Study on the Double Impedance Matching Technique for Improving the Efficiency of RF Systems with Variable Impedance", *Ph.D. Thesis, Konkuk University*, 2018.
9. D. G. Choi and C. Y. Won, "Automatic Matching Circuit for Plasma Generation", *The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 7, No. 1, pp.16-20, 2002.
10. D. G. Choi and W. J. Jang, "Plasma Generator & Auto Matching Network", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 1995 Autumn Conference*, pp. 60-63, 1995.
11. S. D. Choi, "RF Generator", *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol 7, No. 1, pp. 12-15, 2002.

접수일: 2022년 5월 23일, 심사일: 2022년 6월 17일,
 게재확정일: 2022년 6월 22일