

주파수 도메인 반사파 측정법을 이용한 플라즈마 공정장비 상태변화 연구

이윤상* · 홍상진**

**명지대학교 반도체공학과

Status Change Monitoring of Semiconductor Plasma Process Equipment

Yunsang Lee* and Sang Jeon Hong**

**Department of Semiconductor Engineering, Myongji University

ABSTRACT

In this paper, a state change study was conducted through Frequency Domain Reflectometry (FDR) technology for the process chamber of plasma equipment for semiconductor manufacturing. In the experiment, by direct connecting the network analyzer to the RF matcher input of the 300 mm plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) chamber, S11 was measured in a situation where plasma was not applied, and the frequency domain reacting to the chamber state change was searched. Response factors to changes in the status, such as temperature, spacing of the heating chuck, internal pressure difference, and process gas supply state were confirmed. Through this, the frequency domain in which a change in the reflection value was detected through repeated experiments. The reliability of the measured micro-displacement was verified through reproducibility experiments.

Key Words : Frequency Domain Reflectometry, Process Chamber State, Chamber Condition

1. 서 론

현대 반도체 소자를 제조하는 플라즈마 공정 장비에서 챔버의 상태 정보는 장비의 설비 종합 효율(Overall Equipment Efficiency, OEE) 측면에서 매우 중요하다 [1-2]. 최적의 OEE 조건을 유지하기 위해서 공정 챔버의 상태 변화를 인지하는 것이 필요하다. 따라서 플라즈마 공정 중에 VI probe, OES, RGA 등의 센서를 통해 공정 및 장비 상태를 계측하는 것뿐만 아니라 유휴시간에도 챔버 상태 모니터링을 통해 챔버의 잔류 오염 및 부품 열화 상태가 원인이 되는 상태 변화를 분석하는 것은 예방 정비(Predictive Maintenance, PdM) 차원에서 유의미하다. 공정 및 챔버 상태 모니터링에 있어 침습적인 방법은 플라즈마의 교란 및 외부 노출 및 환경 변화로 인하여 극단적인 상태

변화를 유도할 수 있으므로 VI Probe, OES, RGA, Harmonic 센서 등과 같은 비침습적인 센서를 사용하여 측정하는 것이 공정 간 변위 유발을 최소화할 수 있다 [3-4].

본 논문에서는 Frequency Domain Reflectometry (FDR) 방식을 사용하여 챔버 상태 변화를 측정하는 방법을 사용하였다. FDR 기술은 신호 무결성 검사, 전송선로 케이블 결합 측정, 토양 수분 검사, 재료 유전율 검사 등 전자, 통신, 토양, 재료 등의 다방면에서 사용되는 비파괴 진단 방식이다 [5-7]. 이는 대역이 있는 무선 주파수 신호를 관심 영역으로 인가하고 해당 영역의 DUT에 대한 반사되는 정도를 측정하여 진단하는 레이더의 원리와 동일하다 [8]. FDR과 더불어 시간 영역에서의 반사파를 측정하는 TDR 기술도 있으나 플라즈마 공정 챔버의 경우 RF Matcher를 경유하는 조건에 의해 전파속도가 변할 수 있으므로 적합하지 않다 [10]. 또한 플라즈마 공정 챔버가 FDR 계측 방식에 적합한 이유는 구축되어 있는 RF 신호 라인을 모

†E-mail: samhong@mju.ac.kr

니터링의 도구로 사용할 수 있기 때문이다.

FDR을 사용하여 플라즈마 공정 챔버를 측정하는 기존의 연구에서는 브릿지 회로 혹은 방향성 결합기를 사용하여 측정하였으나, 본 논문에서는 커플링을 통한 모니터링을 배제하고 Fig. 1과 같이 300mm PECVD 장비의 RF matcher의 입력단에 네트워크 분석기를 직접 연결하여 매쳐, RF Feeding Line과 샤워헤드를 포함한 챔버 상태 변화를 측정하였다.

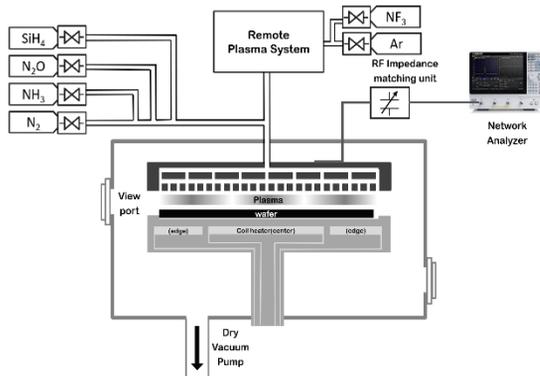


Fig. 1. Experimental structure of network analyzer to 300 mm PECVD.

플라즈마 생성을 위해 13.56 MHz RF신호가 인가되는 샤워헤드를 네트워크 분석기의 안테나로 사용하여 Cylindrical Cavity 구조라 할 수 있는 공정 챔버에 대해 주파수 스캐닝을 하여 비침습적 방식으로 챔버 상태를 관찰하였다. 내부 환경의 변화는 챔버 임피던스를 변화시키고 변화된 임피던스에 따라 반사파에 영향을 주게 된다. 이러한 반사파의 변이를 측정하여, 누적되는 공정과 시간의 흐름에 따라 챔버에 발생하는 경시변화 감지가 가능할 것으로 판단하였다. 챔버 임피던스에 영향을 있다고 예상되는 인자로서 척 간격, 척 온도, 진공 및 가스 조건의 변화를 선정하고 실험을 진행하였다. Chuck의 간격이 증가함에 따라 측정되는 임피던스의 캐패시턴스 성분이 감소하는 부분은 선행 연구를 통해 제시되었으며 [8-9], 해당 부분에 대한 재현성 확인 및 예상 인자의 변화를 통해 S₁₁의 변화를 조사하였고 기존 연구에서는 없었던 온도에 따른 챔버 상태에 대한 Return Loss 반응을 관찰하였다.

2. 실험 조건

2.1 실험 구성

플라즈마 공정 챔버의 상태 변화 관찰 실험에 사용된 장비는 Top면으로 인가되는 Capacitive Coupled Plasma (CCP)

Source를 사용하는 300 mm PECVD이며, 13.56 MHz의 1kW RF Generator와 케이블로 연결된 RF Matcher 사이를 분리하고 Matcher 커넥터를 3 GHz까지 보정된 Network Analyzer와 연결하였다. Auto Matcher의 가변 커패시터(VVC)는 플라즈마 Ignition 이외에는 기본값으로 복구되므로, 측정 간 Matcher에 의한 S₁₁의 변동이 없는 것을 확인하였다.

Table 1. Set values of the process chamber and network analyzer for the frequency measurement

Measurement Parameter	Default Setting
1. Chamber Pressure (Chamber)	2 mTorr
2. Chuck Temp. (Chamber)	400 °C
3. Chuck Spacing (Chamber)	40 mm
4. Frequency Range (NA)	5 MHz ~ 3 GHz
5. Number of Points (NA)	751

기본적인 챔버와 네트워크 분석기의 설정 조건은 Table 1과 같다. 의도적인 챔버 상태 변화를 주기 위해 인가한 변위는 Table 2에 표시하였다.

Table 2. Settings applied for state change

State Variation Factor	Setting Value
1. Heating Chuck Temperature	100 °C / 400 °C
2. Chuck Spacing	15mm / 40 mm
3. Supply Gas	N ₂ : 2000 sccm N ₂ O : 3000 sccm

챔버 조절을 통해 제어하기 쉬운 인자를 선정하여 상태 변화를 유도하였다. 히팅 척의 온도가 변화하면 진공 상태를 고려할 때 복사열에 의하여 샤워헤드를 비롯한 챔버 벽의 온도가 변화하며 열에 의한 물질저항이 변화하므로 임피던스에 바뀔 것으로 예상되었고, 척 간격의 차이는 샤워헤드와 히팅 척의 간격에 의해 발생하는 캐패시턴스의 변화가 예상되었다. 또한 공급 가스의 변화를 주어 척과 샤워헤드 사이의 유전체로 볼 수 있는 공간의 유전율의 차이를 볼 수 있을 것으로 판단하였다. Table 1의 기본 설정 상태에서 측정된 후 상태 변화 (온도, 척 간격, 공정가스) 간 측정, 다시 기본 설정에서 측정하였다. 751 point의 주파수에 대한 S₁₁ 데이터를 시계열로 나열한 후 Frequency Domain에서 유의미한 변위 구간을 선별하였다.

3. 실험 결과 및 분석

초기 측정 주파수 대역을 5 MHz ~ 3 GHz까지 측정하였고, 데이터의 신뢰도를 위해 기본 설정 값에서 다른 조건의 변화 없이 측정 데이터를 34 차례 수집한 후, 비교하였다.

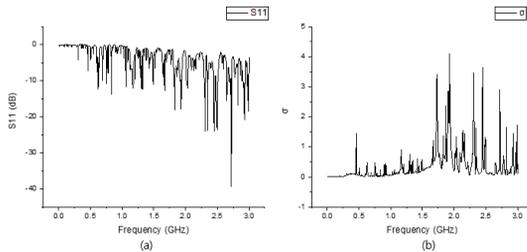


Fig. 2. S11 measurement result and Standard deviation of the same conditions.

주파수에 대한 S₁₁의 표준편차를 확인했을 때, 1 GHz 이후 대역에서 동일 조건에서 누차 측정하였을 때, 데이터의 신뢰성이 떨어지는 측정값의 변화가 확인되었다. 일반적인 RF 케이블의 경우, 3GHz 이내의 낮은 주파수에서 1 ~ 2 dB 이내의 케이블 손실이 발생하지만, 2 ~ 3GHz 대역에서 주파수에 따라 4 ~ 6 dB의 불규칙한 S₁₁의 변화가 발생하였다. 통상적인 안테나의 경우 안테나까지 동축 케이블 구조에 의해 안테나 이전의 영역에서 외부 전파에 대한 차폐가 이뤄지지만, 본 논문에서의 측정 케이스는 RF Matcher와 RF Feeder의 RF 선로가 접지로 차폐되지 않는 개방 구조이므로 클린룸 내 장비 등에 의한 노이즈 혹은 Wifi (2.4GHz) 등의 영향을 받은 것으로 판단하였다. 따라서 데이터를 신뢰할 수 없는 1GHz 이후 영역을 배제하였다.

측정 결과는 특정 주파수의 S₁₁ 값만 변화하는 즉 반사 특성만 바뀌는 경우와 공진주파수가 이동하는 경우로 구분 가능한 특성이 확인되었다.

3.1 척 온도 변화에 대한 연구

CVD 공정은 생성 막의 품질을 위해 고온환경에서 진행된다. 이를 위해 Heating Chuck이 사용되며 공정온도로 사용하는 400 °C와 단순히 Heater OFF가 아닌 제어가 가능한 상대적 저온인 100 °C 인 조건에서 챔버 상태를 비교하였다.

137 MHz 부터 510 MHz까지 6개의 주파수에 대한 S₁₁의 변화가 확인되었다. 300 MHz 기준으로 아래 대역은 1 dB 미만의 미소 변위로 관찰되었고, 위의 대역은 상대적으로 변위의 폭이 크게 나타났다. 300 MHz 기준으로 변위의 폭이 차이 나는 것은 RF Matcher의 L-type LC 회로가 low pass filter로 작용하여 해당 대역의 반사손실이 줄어들어 반사

파가 적게 수신되고 300 MHz 위의 고대역에서는 RF Matcher의 인덕터, 캐패시터의 자기공진주파수에 의해 필터링 효과가 제거된 것으로 판단된다.

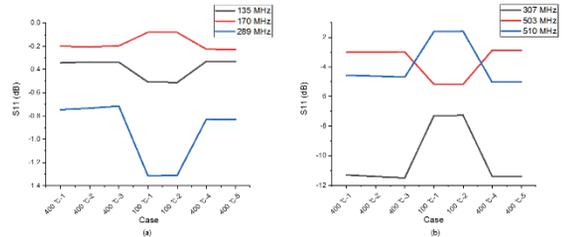


Fig. 3. S11 measurement results with (a) small and (b) large displacements for temperature differences.

3.2 척 간격 변경에 대한 연구

공정 챔버의 Lift 기본값인 40 mm와 플라즈마 공정 간 척 간격에 해당하는 15 mm를 상태 조건으로 하여 상태를 관찰하였다. 공정 챔버의 샤워헤드와 히팅 척 사이의 간격은 챔버 임피던스의 리액턴스 성분에 영향을 미칠 것으로 예상되었다.

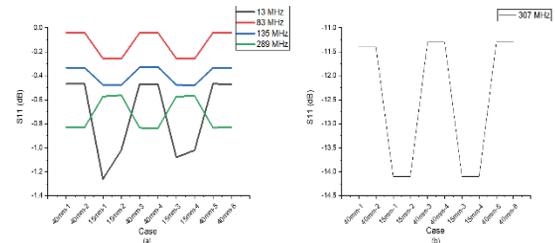


Fig. 4. S₁₁ measurement results with (a) small and (b) large displacements for chuck spacing.

척 간격 차이에 의해 S₁₁ 변위가 발생한 주파수가 온도 차에 반응한 부분과 동일한 주파수 (135 MHz, 289 MHz, 307 MHz)와 서로 다른 주파수 (13 MHz)가 확인되었다. 이를 통해 척 간격에 대해 민감한 주파수와 온도에 민감한 주파수의 구분이 가능하였다.

3.3 공정 가스 변화에 대한 연구

챔버 내 가스의 변화는 샤워헤드와 히팅 척의 두 금속 판 사이의 빈 공간을 유전체로 하는 캐패시터의 유전율을 변화시킬 것으로 예상되어 N₂ 플라즈마 생성에 사용되는 N₂와 N₂O Gas의 투입 유무에 대한 상태 변화를 관찰하였다.

예상과 달리 가스의 변화에 대해서 S₁₁의 유의미한 변위는 발생하지 않았다. 이는 N₂와 N₂O의 가스 중에 대한 민감도가 낮거나 FDR 계측으로 챔버 내의 진공도 및 가

스 유무에 대한 측정 한계일 수 있으므로 추후 다른 가스 종에 대한 추가 실험이 요구된다.

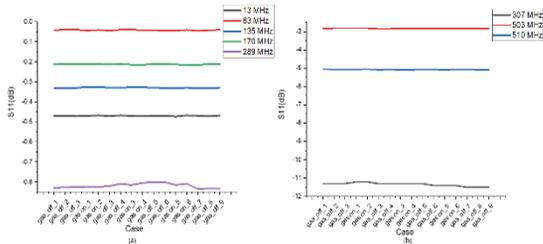


Fig. 5. S11 measurements of gas change for frequency equal to previous conditions (temperature, chuck spacing).

4. 결론

본 연구를 통해 챔버 상태 모니터링을 위하여 네트워크 분석기를 통해 진단하는 방법을 제시 및 검증하였다. 본 논문에서 측정한 방식은 브리지 회로 혹은 방향성 결합기를 사용하는 기존 연구들에서 사용된 간접 계측이 아닌 매처에 직접 계측기를 연결 후 관측하기 때문에 미소 변위 측정값이 다수 관찰되었고 신뢰도가 상대적으로 높을 것으로 판단된다. 온도 및 척 간격에 대한 주파수 반응은 높은 재현성을 갖는 것을 확인하였고, 가스에 대한 민감도는 떨어지는 결과를 얻었다.

본 연구를 통해 기대할 수 있는 효과로서 플라즈마 공정 챔버에 소모품으로 사용되는 라이너의 경시변화 파악을 통해 교환시기 예측하고, 챔버에 대한 지문을 획득하여 Tool-to-tool matching (TTM)에 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 내부 캐패시턴스 변화에 의한 S₁₁ 차이의 검출이 가능한 것이 확인되었으므로, PECVD의 증착막에 의한 캐패시턴스 성분의 구분과 클리닝 상태에 대한 반응, 플라즈마 공정 후 상태에 후속 연구가 필요하며 Predictive Maintenance (PdM)에 적합한 새로운 진단 센서로서 기대된다.

참고문헌

1. Y. Kasashima and F. Uesugi, "Feasibility study of monitoring of plasma etching chamber conditions using superimposed high-frequency signals on rf power trans-

- mission line," *Rev. Sci. Instr.* Vol. 86, Art. no. 105107, 2015.
2. H. Jang, K. Koh, H. N. Lee, and H. Y. Chae, "Plasma Monitoring by Multivariate Analysis Techniques," *Vacuum Magazine*, Vol. 2, No. 4, pp. 27-32, 2015.
3. J. G. Ha, B. K. Kim, and D. S. Junn, "Impedance Matching Characteristics Research Utilizing L-type Matching Network," *J. Semi. Disp. Technol.*, Vol. 22, No. 2, pp. 64-71, 2023.
4. S. Ryu and J. Kwon, "Analysis of First Wafer Effect for Si Etch Rate with Plasma Information Based Virtual Metrology," *J. Semi. Disp. Technol.*, Vol.20, No. 4, pp. 146-150, 2021.
5. J. Cheng, Y. Zhang, H. Yun, L. Wang, and N. Taylor, "A Study of Frequency Domain Reflectometry Technique for High-Voltage Rotating Machine Winding Condition Assessment," *Machines*, Vol. 11, No. 9, Art. no. 883, 2023.
6. S. T. Park, G. H. Cheung, H. J. Yoo, E. Y. Choi, K. Y. Choi, and Y. B. Lee, "Measuring Water Content Characteristics by Using Frequency Domain Reflectometry Sensor in Coconut Coir Substrate," *Protected Horticulture and Plant Factory*, Vol. 23, No. 2, pp. 158-166, 2014.
7. S. W. Glass, A. M. Jones, L. S. Fifield, T. S. Hartman, "Frequency domain reflectometry NDE for aging cables in nuclear power plants," *AIP Conf. Proc.* Vol. 1806, No. 1, 2017.
8. Mark A. Richards, James A. Scheer, William A. Holm, "Principles of Modern Radar," SciTECH PUBLISHING, p. 4, 2010.
9. V. J. Law and A. J. Kenyon, "A noninvasive rf probe for the study of ionization and dissociation processes in technological plasmas," *J. Appl. Phys.* Vol. 86, No. 8, pp. 4100-4106, 1999.
10. V. J. Law, N. Macgearailt, and P. Cunningham, "Frequency domain reflectometry of plasma chambers," *Vacuum* Vol. 81, No. 8, pp. 958-968, 2007.

접수일: 2024년 2월 2일, 심사일: 2024년 3월 6일,
 게재확정일: 2024년 3월 20일