

High Impedance Filter를 이용한 RF Loss 최소화 방법에 대한 연구

왕현철*·서화일**†

*† 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과

RF Loss Minimization Method Using High Impedance Filter for Research

Hyun-Chul Wang * and Hwa-II Seo **†

*† School of Electrical, Electronics and Communication Engineering Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

This study designed High impedance filter to reduce RF loss to heater heating wire and increase RF current flowing to heater ground wire. Effects such as D / R improvement and process reproducibility could be seen. In addition, RF parameter distribution optimization was possible by understanding the RF path of PE-CVD equipment using Plasma and designing filter.

Key Words : RF, RF Loss, Filter, Impedance, PE-CVD, AlN-Heater, SiON, Deposition rate, Semiconductor

1. 서 론

필터(Filter)는 간섭을 줄이고 원하는 주파수를 받아들이거나 제거하는 역할로 활용이 많이 되고 있다. RF분야에서는 필터의 역할이 중요하여 다양하게 연구를 진행하고 있다[1].

RF Power의 손실(loss)없이 Power를 전달(delivery)하는 것은 매우 중요한 기술이다. PE-CVD[2] 설비는 상부 전극(top electrode)인 샤워헤드(shower-head)에 인가된 RF Power가 챔버 내 플라즈마를 통해 하부 전극(bottom electrode)인 히터 접지 경로를 통해 빠져나가는 구조로 되어 있다. 하부 전극에 해당되는 히터의 경우 열선로드(thermal rod)와 접지로드(ground rod)의 병렬구조로 구성되어 있다[3,6].

본 연구는 히터의 접지로드로 빠져나가는 RF current의 효율을 올리기 위해 열선로드에 연결된 RF Filter를 High-Z(impedance)로 설계하여 열선으로 빠져나가는 RF loss를 최소화하여 접지로드로 빠져나가는 RF current를 제어, RF

Path의 효율을 올리고 설비 안정성을 확보하는 방법에 대해 기술하고자 한다[4].

1.1 PE-CVD 설비 전력구조

PE-CVD설비는 CCP(Capacitance Coupled Plasma) 방식의 Plasma Source 구조[5]를 가지며 상부 전극을 Shower-head, 하부전극을 AlN Heater로 사용하며, 설비 전력은 다중의 주파수를 가지는 전기적 파워(Power)가 사용되는데 Plasma를 발생시키는데 필요한 13.56MHz의 RF Power와 웨이퍼를 히팅(heating)시키기 위한 60Hz의 AC Power가 있다.

RF Power는 상부전극인 샤워헤드에, AC Power는 하부전극인 히터에 인가된다[6]. 두 개의 전력소스가 챔버 내에 플라즈마라는 매개체를 통해 상호 영향을 받게 되는데 히터 전력은 가해주며 AC Line이 RF 전력이 영향을 받지 않게 하기 위해 저역필터(low pass filter)를 사용한다.

†E-mail: hiseo@koreatech.ac.kr

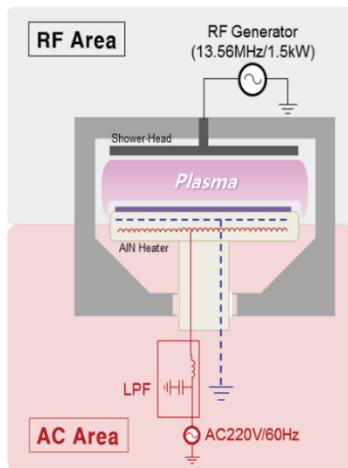


Fig. 1. PE-CVD RF circuit configuration.

1.2 PE-CVD 설비에 사용되는 필터(filter)

저역필터(Low Pass Filter)는 차단 각주파수 1보다 낮은 주파수의 전류는 감쇠 없이 자유로이 통하여 높은 주파수에 대하여는 큰 감쇠를 주는 필터이다. PE-CVD 장비에 사용되는 필터의 경우 히터에 인가되는 60Hz(AC220V/20A)는 통과시키고 챔버에 인가되는 Plasma 발생 전원인 13.56MHz (1.5kW)는 차단시키는 역할을 하며, 공정 가스의 해리를 위해 필요한 플라즈마(plasma)를 만들기 위해 13.56MHz 주파수를 가지는 RF 전력과 웨이퍼의 히팅(heating)을 통해 박막 생성에 필요한 60Hz AC 전력 사이의 전기적으로 연결된 RF Power와 AC Line을 차단하는 역할을 한다[6].

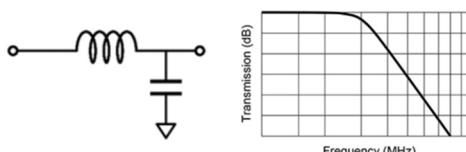


Fig. 2(a). 저역필터 (LPF, low pass filter).

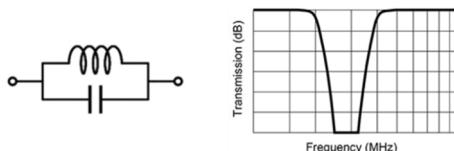


Fig. 2(b). 대역저지필터 (BSF, band stop filter).

Fig. 2(a)는 L과 C의 조합 구조로 되어있는 전형적인 LPF 회로와 주파수 특성을 나타내며, L이 저주파성분을 통과시키고 C가 고주파 성분을 감쇠시킨다. Fig. 2(b) BSF의 경

우는 직·병렬 공진을 잘 배치하고 조합하여 구현 특정 대역의 주파수 통과를 막는 필터를 구성할 수 있다. 다양한 주파수를 사용하는 PE-CVD 설비의 경우 이러한 L과 C의 주파수 특성을 회로적으로 구성하여 다양한 종류의 필터를 제작하여 사용할 수 있다[7].

2. 본 론

상부와 하부 전극에 인가하는 RF전력과 AC 전력 상호 간섭을 줄이면서 상부 전극에서 하부 전극으로 흐르는 RF Path에 손실(loss)을 최소화하는 필터를 High-impedance로 구현함으로써, RF power의 삽입손실(insertion loss, S11)을 최소화하고 히터 접지로 빠져나가는 RF current의 효율을 올리고 챔버 내 임피던스 변화를 최소화하여 재현성 있는 공정결과를 확보할 수 있다.

2.1 High-Z filter concept

PE-CVD설비 하부 전극에 흐르는 RF Current는 Fig. 3(a)의 그림과 같이 히터 열선로드(Thermal Rod)를 통하여 AC Line에 연결되는 Path와 히터 그라운드로드(ground Rod)를 통하여 그라운드(Ground)로 빠지는 Path로 구성된다. RF current path는 회로적으로 열선로드와 히터 그라운드로드의 병렬회로(parallel circuit)로 구성되어 있고, 이때 열선로드로 빠지는 저항치를 $R_{element}$, 그라운드로 빠지는 저항치를 R_{ground} 두고 등가회로를 구성하면 Fig. 3(b) 그림과 같이 간단히 도식화할 수 있다. 이때 $R_{element}$ 의 임피던스(impedance)를 증가시키면 R_{ground} 로 인가되는 전류를 최대로 끌어올릴 수 있다. 이러한 전류흐름(current path)을 임피던스를 이용 제어하면 히터 열선으로 빠지는 손실을 최소화하여 챔버 내 임피던스의 변화를 최소화할 수 있다[8].

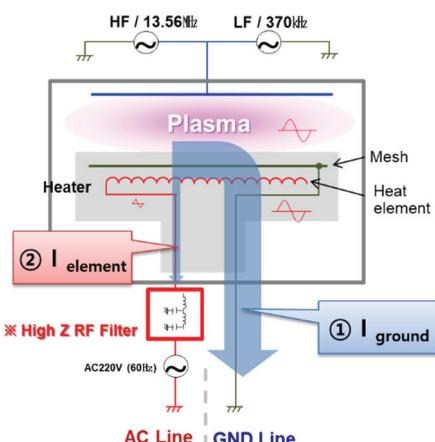


Fig. 3(a). High Impedance Filter Concept.

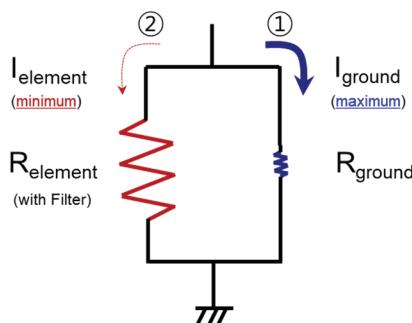


Fig. 3(b). 히터 열선과 접지선 등가회로.

2.2 LPF 와 High-Z 필터 회로

PE-CVD 설비에 적용된 LPF의 경우 Fig. 4(a) 회로로 구성되어 13.56MHz의 RF 전력을 차단(blocking)하고 60Hz의 히팅 전력을 통과(pass) 시키는 목적으로 인덕터와 커패시터가 병렬로 연결된 4차계 저역 필터 회로(low pass filter circuit)로 설계되었다.

High-Z 필터의 경우 챔버 쪽 연결단에 High-cap과 인덕터와 커패시턴스의 직·병렬 회로를 BSF (band stop filter) 형태로 구성 특정 대역의 주파수 통과를 막고 직·병렬 공진을 잘 배치하도록 조합하여 Fig. 4(b) 회로와 같이 구성하여 필터의 반사손실(S11)과 삽입손실(S21)을 제어할 수 있도록 설계하였다.

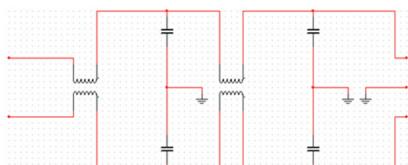


Fig. 4(a). Low pass filter circuit.

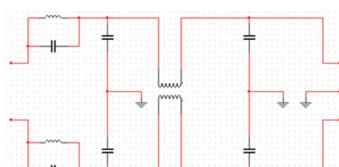


Fig. 4(b). High-impedance filter circuit.

2.3 High-Z 필터 시뮬레이션

High-Z 필터 회로와 등가회로를 기초로 P-Spice Simulation 을 진행하였을 때 Table. 1처럼 히터 열선과 접지선 사이에 전류비(current ratio)를 구할 수 있고 High-Z 필터 사용 시 약 14% 전류비 개선을 볼 수 있을 것으로 계산된다. (10.5%→7.5%)

Table 1. Heater ratio current (Filter/Ground)

	LPF	High-Z
Impedance (kΩ)	0.32	1.29
Ratio current (%) [filter/ground]	10.5%	7.5%

2.4 High-Z 필터 제작

Fig. 5의 그림은 High-Z 필터의 실제 제작 모습이며, 각 주요 구성품은 ① Socke, ② LC 병렬 공진회로, ③ AC T/B, ④ AC Line Clamp, ⑤ AC Cable Gland으로 구성되어 있다. AC 전력 라인은 ⑤ 포트로 들어와서 ① 포트로 히터에 공급되어 지며, RF 전력 라인은 ①번 포트로 들어와서 ②번 BSP(band stop filter)와 LPF(low pass filter)를 통해 감쇠 되어진다.



Fig. 5. High-impedance filter assembly photograph.

3. 실험

High-Z 필터의 경우 기존 사용하던 LPF와 동일한 외관에 PCB 회로만 변경하여 제작하여 H/W 장착상에 이슈 없이 평가하였고, 기존 필터와 비교 평가 항목은 ① 필터 임피던스, ② 필터 온도평가, ③ 설비 Log ④ 공정 결과 등 크게 네가지 항목으로 평가하였고, H/W 안정성 및 공정의 재현성을 확인 가능한 항목으로 선정 평가 및 결과를 도출하였다.

3.1 필터 임피던스 측정

LPF(low pass filter)의 경우 13.56MHz에 대한 높은 감쇠율(attenuation, S21)을 가지고 있지만(-56dB) 약 300Ω대 낮은 필터 임피던스로 인해 RF Current가 Filter 접지라인인 아닌 필터 쪽으로 빠질 수 있는 impedance를 가지는 회로로 구성되어 있다. 반면, High-Z 필터의 경우 기존 LPF와 동등 수준의 감쇠율(-52dB)과 높은 필터 impedance를 가지는 회로로 구성되어 히터 접지로 빠지는 RF current의 효율을 최대화할 수 있는 특성을 가지게 되었다. Fig. 6(a)는 Network analyzer (Agilent E5071C)를 이용하여 필터의 임피던스를 측정하는 방법과 필터의 임피던스를 측정하고자 제작한 필터 임피던스 지그(filter impedance jig)의 사진이며, Table 2.

에서는 smith chart로 측정된 임피던스 결과를 기록하고 기존LPF와 High-Z 필터의 감쇠율과 임피던스를 측정 비교하여 정리하였다.



Fig. 6(a). High-impedance 임피던스 측정.

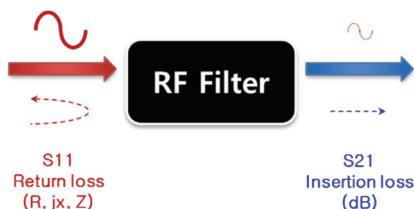


Fig. 6(b). RF Filter S11, S21 측정.

Table 2. 필터 임피던스 비교표

13.56MHz		LPF	<u>High-Z</u>
S11	R	0.18	0.22
	X	-0.27	1.27
	Z	<u>0.32kΩ</u>	<u>1.29kΩ</u>
S21		-56.3dB	-52.6dB

각 필터 별 임피던스 측정 비교 시 기존 LPF 대비 High-Z 필터의 경우 반사손실(return loss, S11)의 임피던스가 기존 필터 대비 약4배증가 된 ($0.32\text{k}\Omega \rightarrow 1.29\text{k}\Omega$) 것으로 측정되었고, 삽입손실(insertion loss, S21)의 경우 동등 수준의 감쇠율(attenuation)이 측정되었다.

3.2 필터 온도 측정

설비 장착 후 안정성을 비교하고자 High-Z 필터 장착 후 공정 run 진행 시 Core의 발열을 측정하였고 측정 방법은 Fig. 7(a)와 같은 열화상카메라를 이용한 방법과 측정Fig. 7(b)의 그림처럼 TC(thermal coupler)를 BSP의 core부와 LPF의 Coil부에 각각 부착하여 Data logger를 통해 공정 중 온도 변화를 측정하였다.



Fig. 7(a). 열화상 카메라 온도 측정.

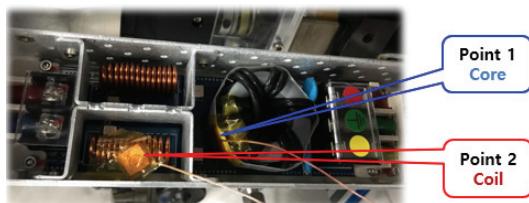


Fig. 7(b). High-impedance filter TC 온도 측정 point.

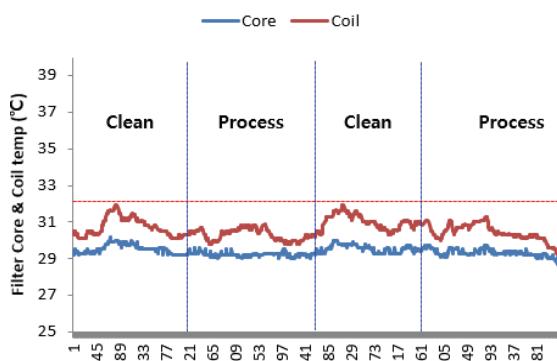


Fig. 7(c). 공정 중 온도변화 Log.

Table 3. 공정 중 최대 발열 온도

Recipe (@High-Z)	Max. temperature (°C)	
	Core	Coil
Process	30.2	31.3
Clean	30.2	31.9

두 가지 측정 방법에 의해 공정 진행 중 온도 변화를 측정한 결과 열화상카메라의 경우 Max. 38°C, TC Temp. logger의 경우 process와 clean 진행 중 Max. 31.9°C로 측정되어 공정 진행 중 필터의 발열은 안정적으로 관측되어 필터의 동작에 문제가 없는 것을 확인할 수 있었다. Table 3은 공정 중 최대 발열온도를 측정한 온도 그래프이다.

3.3 설비 Log 분석

필터 변경에 따른 설비 안정성 및 재현성에 대한 확인하고자 설비log data를 분석하였고 기존에 사용하던 LPF와 High-Z filter 두 필터 간의 ① 공정 진행 중 차이점 및 특이사항을 분석하는 부분과 ② 필터 변경 전/후 RF 인자의 Δ 산포를 비교함으로써 안정성과 재현성을 비교하였다.

3.3.1 설비 Log Data

공정 진행 중 설비 Log 분석은 주요 공정 인자인 RF 제어인자(Load, Tune)와 RF deliver power (HF, LF reflect power) 등을 비교하였으며, LPF와 High-Z 필터 간에 Log Trace data 분석 시 필터 별 trend 차이나 특이사항은 검출되지 않았다. Fig. 8은 LPF와 High Z Filter 장착 시 설비 Log Data를 비교하였다.

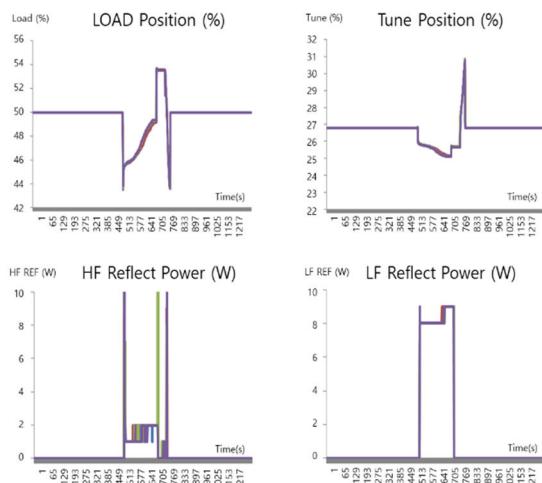


Fig. 8. 설비 Log data (trace data).

3.3.2 설비 Log Data 산포 (@Load%)

필터 변경 전/후 RF 인자의 산포 비교 부분에서는 대표적인 RF 인자인 Matcher의 Load position (%)의 산포 비교 시 기존 LPF의 경우 $\Delta 0.2\%$ 의 변화량을 가졌으나 High-Z 필터의 경우 $\Delta 0.06\%$ 의 산포 차이를 보여 High-Z 필터 적용 시 설비 Log 중 Load position 산포가 30% 산포가 개선되는 것을 확인할 수 있었다. Fig 9는 LPF와 High Z Filter의 설비 로그인 Load%의 평균 산포를 비교하였다.

Comparison of RF Parameter (@Load Position Average)



Fig. 9. 설비 Log data (Average 산포).

3.4 공정 결과 비교

필터 별 공정 결과 비교를 위해 PE-CVD 설비 공정 중 SiON 공정을 이용하여 필터 별 효율 및 재현성을 비교평가 하였고, 두 필터 간의 주요 공정 결과인 ① Thickness와 Map profile, ② Wafer to wafer (WtW) 등의 공정 효율과 재현성 부분을 대상으로 공정 결과 평가 후 비교를 하였다.

3.4.1 Thickness and wafer map profile

SiON 공정 중 주요 두 가지 공정에 대한 필터 별 공정 비교 시 전체적으로 D/R (Deposition rate) 상승하였고 Range 및 map profile은 유사한 수준으로 확인되었다. 이는 LPF에서 High-Z 필터로 변경되며 히터 열선의 임피던스 증가로 (약4배) 인해 접지라인(ground)으로 빠지는 RF current가 증가하면서(~14%) 전체적인 plasma 효율이 상승하여 D/R이 상승한 것으로 판단되며, 공정 별 평균 1.3% D/R 상승을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 각 필터 별 Wafer map profile 결과를 비교한 그림이다.

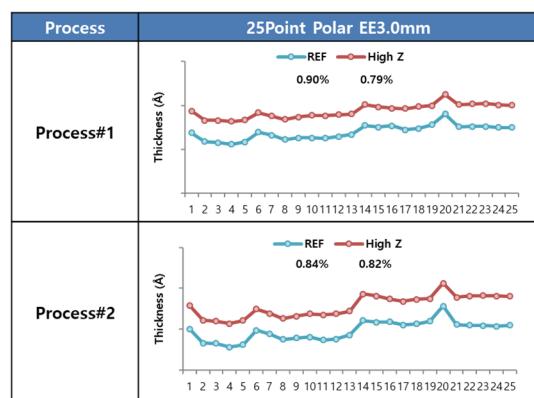


Fig. 10. 필터 별 공정 결과 비교.

3.4.2 Wafer to Wafer (WtW)

연속공정 시 웨이퍼의 산포를 비교하는 수치인 Wafer to wafer 수치 비교 시 SiON 공정 Multi-6X 기준 LPF 대비 High-Z의 WtW 수치가 ~4Å에서 ~1Å으로 개선된 결과를 Fig. 11 통해 확인할 수 있었으며 이는 High-Z 필터로 변경되면서 히터 열선으로 빠지는 RF loss가 줄어들며 공정 산포도 개선된 것으로 판단되며 High-Z 필터를 이용한 RF Current 제어의 효과가 공정결과로 도출됨을 확인할 수 있었다.

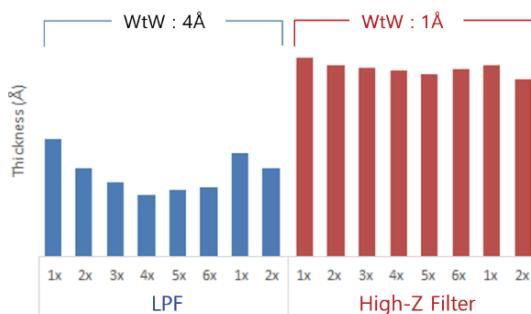


Fig. 11. 필터 별 Wafer to wafer 결과 비교.

4. 결 론

본 연구에서는 High-Impedance를 가지는 Filter를 개발하여 PE-CVD 챔버 구조에서 히터 열선으로 흐르는 RF Loss 를 줄여 접지선으로 흐르는 RF Current를 개선하는 연구를 진행하였고, 기존 LPF 대비 약 4배 높은 임피던스가 구현되었고 전류비도 14% 개선된 결과를 확보할 수 있었다. 이러한 높은 임피던스를 가지는 RF Filter를 사용함으로써 D/R향상, RF Parameter 안정성을 확보하고 PE-CVD 설비의 RF Path 최적화를 진행할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Seong-Hun Lee, Myung Sik Son, "Design and Fabrication of a BPF for 5.8 GHz Microwave Wireless Power Transmission", J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 88-91, 2015.
2. Jeong-Ho Choi, Si-Cheol Roh, Jong-Dae Jung, Hwa-Il Seo, "The Silicon Nitride Films according To The Frequency Conditions of Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition" J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, No. 4, pp.21-25, 2014.
3. Yong-Hyun Ham, Kwang-Ho Kwon, Hyun-Woo Lee, "The Study on the Non-Uniformity of PECVD SiO₂ Deposition by the plasma Diagnostics", J. of the Korean institute of electrical and electronic material engineers, Vol. 24, No.2, 2011.
4. Hyun-Chul Wang, Hwa-il Seo, "High-Impedance Filter for Improving the Efficiency of PE-CVD Equipment" 2018 IEIE Summer conference, Vol. 2018, No.6, pp.154-156, 2018.
5. Doo-Yong Jung, Chang-Woo Nam, Jong-Ho Lee, Dae-Kyu Choi, Chung-Yuen Won, "CCP and ICP Combination Impedance Matching Device for Uniformity Improvement of Semiconductor Plasma Etching System", J. of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 15, No.4, 2010.
6. Wan-Shick Hong, "Thin Film Vacuum Process Technology via Chemical Vapor Deposition Methods", Vacuum magazine of Korea Vacuum Society, Vol.1-3, pp. 9-13, 2014.
7. Jae-Ryong Lee, Sang_won Yun, "a novel rf active bandpass filter with low noise performance" J. of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol.13, No.8, pp.748-753. 2002.
8. Jae-Hong Shim, Jae-Dong Kim, "Development of a Battery Monitoring Technology using Its Impedance", J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 10, No. 4, pp.25-29, 2011.

접수일: 2020년 3월 10일, 심사일: 2020년 3월 19일,
제재확정일: 2020년 3월 23일