



반도체 Fab 내 전자파 차폐 Shield 효과성에 대한 연구

김태환^a, 홍태선^a, 이민욱^{a,*}

Effectiveness of Electromagnetic Shielding in Semiconductor Fab

Taehwan Kim^a, Taesun Hong^a, Min uk Lee^{a,*}^a Department of Semiconductor Engineering, Myongji University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	5	August	2025
Revised	31	August	2025
Accepted	13	September	2025

Keywords:

Radio frequency (RF)
Microwave (MW)
Electro magnetic compatibility (EMC)
Electro magnetic interference (EMI)
Electro magnetic susceptibility (EMS)
Shield

ABSTRACT

Electromagnetic interference (EMI) issues in semiconductor Fab have become increasingly critical owing to the progress toward highly integrated processes and advanced technology nodes. However, studies pertaining to EMI mitigation in the microwave-frequency range -remains limited. This study experimentally investigates the attenuation behavior of electromagnetic waves in semiconductor Fabs as a function of distance and proposes shielding design guidelines for each frequency band. Conventional core-based RF solutions and newly developed microwave shielding products are compared in terms of their shielding effectiveness. Subsequently, we propose a comprehensive mitigation strategy that expands chip-level EMI countermeasures to equipment, module, and component levels, thereby minimizing process variation. The results of this study provide foundational data for establishing EMI control standards in semiconductor fabs and are expected to contribute to the development of testing protocols aligned with international standards, such as IEC and CISPR. Furthermore, the proposed EMI attenuation techniques offer scalability to other industries.

1. 서 론

반도체 제조공정(Fab)에서 미세화된 공정과 초정밀 장비 운용이 필수적이며, 이를 위해 다양한 Radio Frequency(RF) 및 마이크로 파(microwave) 소스가 사용된다. 반도체 제조 공정이 선단노드로 가면서 기존에 사용하던 Planner type의 Metal Oxide Silicon Field Effect Transister(MOSFET)에서 FINFET, Gate All Around(GAA) 공정으로 변화되면서 전자파 Source를 사용하는 공정들이 많아지고 있다. 기존 Planner에서는 재료의 선택이 중요했다면 구조가 Vertical로 바뀌고 기존 막질을 제거하고 새로운

막질을 새로 채우면서 막질 표면의 Roughness나 Curing에 대한 부분이 중요해지고 있는 상황이다. 이런 측면에서 Treatment라는 신규 공정이 들어오고 이는 RF(300 khz-300 Mhz) 대역에선 효과가 적어 MW(2.45 Ghz 이상)의 전자파 Source를 활용하고 있다. MW는 기존 파장 대비 주파수가 높아서 투과력이 좋고 이로 인해 좀 더 강한 Shield가 필요하게 된다^[1]. Shield 처리가 제대로 되지 않았을 때 발생하는 불가피한 전자파(electromagnetic interference, EMI)는 공정 안정성과 설비 신뢰성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 특히, 선단 공정으로 갈수록 설비의 Sensor 기술은 복잡해지고 장비 내부의 센서 모듈과 고감도 신호라인은 외부/내부 전자파 노

* Corresponding author. Tel.: +82-31-324-1276

E-mail address: min.uk.lee@mju.ac.kr (Min uk Lee).

이즈에 취약해지며, 이는 제품 수율 저하와 설비 장애로 직결된다. 특히 신규 공정으로 도입되는 Atomic Layer Deposition(ALD)은 Uniformity와 공정의 안정성을 위해서 Chamber의 압력 센서의 값을 실시간 Feedback 받아서 공정 Control을 진행하는데 이런 취약점으로 인해 공정 산포가 나빠질 가능성이 농후하다.

Fab 내부의 전자파는 주로 Power Line, Signal Line, Matching Unit, 이온 소스 등에서 발생하며, 각 장비 간 간섭(crosstalk)과 장비 내 전도성 EMI가 복합적으로 작용한다^[2]. 특히 반도체 Fab이 Smart Factory화 됨에 따라 기존에 없던 센서들이 달리고 Internet of things(IoT)가 일반적이 되면서 반도체 장비의 전자파 Shield는 개발 단계부터 차폐 설계(shielding), 접지(earthing), 케이블 차폐, 챔버 설계 최적화 등 다층적 솔루션이 요구된다^[3]. 이런 요구사항은 맞추지 못한다면 실제 Fab에서 이상 증상을 보일 것이며, 위에서 언급된 Critical 공정에선 그로 인해 공정 산포까지 악영향을 줄 것이다. 실제로 3차 인증서 내 설비 전자파 인증서를 살펴보면 클린룸 환경과는 다른 외부 테스트 조건에서 제작되거나, 실제 Fab 환경과 다르게 1대의 설비만 Power On 된 상태로 Test, Full Power Test를 진행하지 않기 때문에, 현장 Fab에서의 전자파 실측과 데이터 기반의 실효성 검증이 반드시 선행되어야 한다.

본 연구는 반도체 Fab 환경에서 주요 전자파 발생원을 식별하고, EMI/EMS 실측 데이터 기반으로 차폐 구조와 감쇠 효과를 분석한다. 또한, IEC와 CISPR 표준을 참고하여 전자파 감쇠 설계 적용사례를 고찰하고, 이를 실제 Fab에서 제안할 수 있는 Solution을 제시/유사 고정밀 산업환경으로 확장할 수 있는 실무적 설계 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 본 론

반도체 Fab의 전자파를 모사하기 위해선 우선 측정할 수 있는 장비와 관련 규격에 대해서 정의해야 한다. 측정용 장비는 크게 Oscilloscope, Test Receiver, Spectrum Analyzer 중 Fig. 1에서 표현한 주파수 분석 시 Resolution을 손쉽게 변조할 수 있는 A사의 Spectrum Analyzer를 선택하였고, 계측기와 연결하는 Probe도 방향성에 따라 전자파 영향성을 듣고 방향으로 표현할 수 있는 지향성안테나를 활용하였다. 실제 Fab 환경에서 주변 가변요소가 많아서 측정을 최소 3회 이상 진행하였고, 이 때 Data의 정합성을 판단하였다. 그리고 Probe 또한 종류가 다양한데 전류 Probe, 전압 Probe, Near Field Probe, 지향성안테나 중 설비의 위치 간의 간격과 전자파 Source의 방향성 파악, Sensitivity가 가장 좋은 지향성안테나를 선택하였다. 이를 통해서 실제 Fab 내에서의 상황을 어떤 장해 요소가 만드는지 이를 각도/세기로 Display시킬 수 있는지 Guide화 하였다^[4].



Fig. 1 Spectrum analyzer

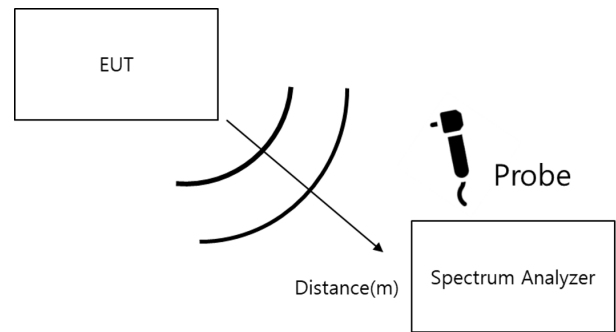


Fig. 2 Measurement method diagram for spectrum analyzer

Table 1 Electromagnetic field strength by location

Distance (m)	Amplitude (dBm)	Attenuation rate (%)
0	41	-
0.5	38	7.31
1	30	26.8
1.5	24	41.4

두번째 구체적인 측면에서 IEC 61000-4-1과 4-3의 일반 산업용의 전자파 시험 규격을 활용하였으며, CISPR 16에서 언급된 Electromagnetic Interference(EMI)의 수치화 를 통해 정량적 분석이 가능하게 하였다. 전자파의 내성과 장해요소를 객관화하고 측정하는 거리와 환경조건을 BM(Benchmarking)하여 실제 Fab 환경에서 어떤 방식으로 측정할 지 고민하고 계획을 세웠다. 이 바탕으로 최종적으로 반도체 Fab 내 전자파 시험 방법을 장비적으로 제정하고자 한다.

Fig. 2에서 보여주는 것처럼 대상체와의 거리를 조절하면서 전자파의 세기를 Probe로 측정하였고, Fig. 3의 결과를 보면 전자파 Source 원에서는 41 dBm의 크기가 측정되고 이후 거리가 멀어짐에 따라 손실률이 커져서 거리의 제곱에 반비례하여 크기가 작아진다. 0.5m/1.5m의 Amplitude를 보면 이론치에서 이야기한 거리 제곱에 반비례보다 좀 더 감쇄율이 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 확장해보면 IEC에서 규정하고 있는 3M 간격 측정은 실제 Fab에선 의미가 없다는 것을 확인할 수 있었다. 실제 Fab에선 설

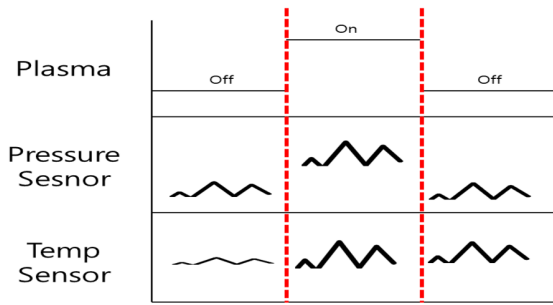
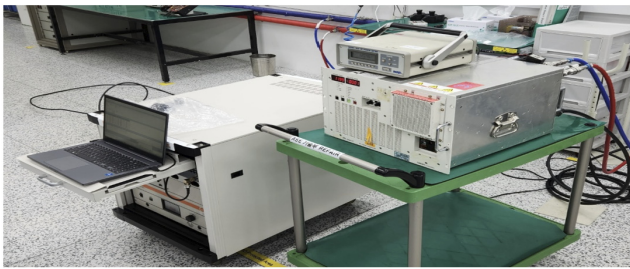


Fig. 3 Influence of pressure sensors in ALD equipment



(a) Voltage tester



(b) Electromagnetic wave detector

Fig. 4 Components of a reproducibility evaluation tool

비 사이의 간격이 Grating 2~3개 사이로 전자파 방해요소가 추가되며 3차 인증서에 나온 EMC Report와는 전혀 상반되는 결과가 도출되었다.

이를 바탕으로 반도체 Fab에서 전자파를 측정할 수 있는 거리와 위치, 적절한 센서에 대해서 다시 선정해야 된다는 필요성에 대해 이해하게 되었다.

Fig. 3을 보면 Plasma on/off 시 설비 내 압력센서 또는 Temp 센서에 영향을 주는데 ALD type의 설비는 압력/온도센서가 실제 공정에 Dominant한 영향을 주기 때문에 Fab 내 위치한 이러한 설비들이 특히 선단노드에 공정 설비에 예상치 못한 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해선 Spectrum Analyzer로 측정된 주파수 성분을 재현성 평가를 통해서 실제 압력 센서에 영향을 주는지 파악이 필요하다. 여기서 재현성 평가라는 부분은 현장에서 문제가 되는 부분을 실험실에서 유사 환경을 조성하여 실제 원인이 되는 것과 결과가 유사하게 나오는지 파악하는 것으로 Fig. 4에서 표현한 것처럼 재현성 평가를 위한 신뢰성 평가 Tool 이 필요하다^[5].

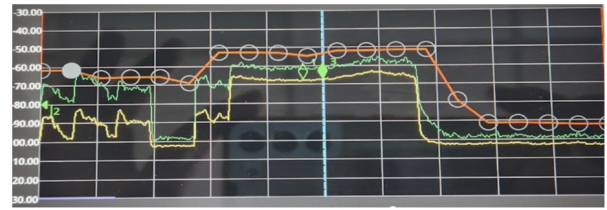
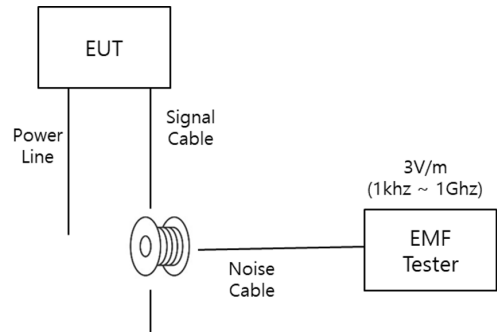
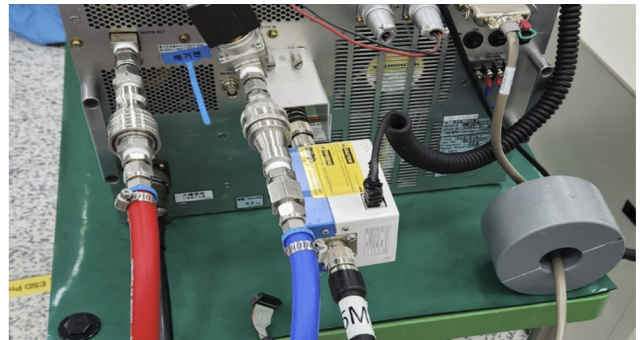


Fig. 5 Spectrum analyzer measurement (Red : Max, Green : Average, Yellow : Min)



(a) Electromagnetic noise application diagram



(b) Actual test connection

Fig. 6 Practical reproducibility evaluation

Spectrum Analyzer로 현장에서 실측하고, 실측된 전자파 크기와 주파수를 기초로 재현성 평가를 실시, 실제 문제와 유사한지 파악을 한다. 이를 바탕으로 Cause-Effect 관계도를 형성하여 해결할 수 있는 Solution을 발굴한다. 특히 RF와 다르게 MW의 경우 투과율이 높기 때문에 Microwave Absorber Sheet나 Nanocrystal Core를 제작/개발해야 한다.

3. 실험 결과 및 분석

Fig. 5를 보면 현장에서 측정된 Data는 Max / Min / Avg의 형태가 다르고 Pulse파가 Data signal과 통신 기반 전자파가 혼재되어 구분하기가 어렵다는 것을 알 수 있다. 현재 측정된 값은 기준치 대비 50 dBm만큼 차이가 나는 것을 보이며 이런 변화치와 실제 센서에 어떤 영향을 주는지 확인해야 한다.

Fig. 6에 전자파 노이즈 인가기를 통해서 해당 주파수의 노이즈

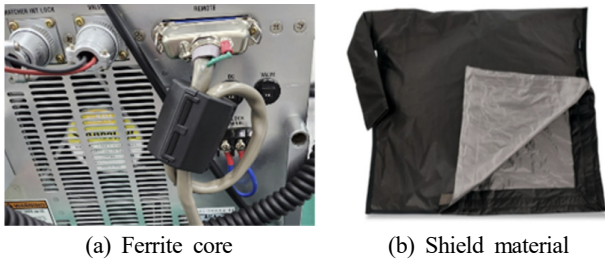


Fig. 7 Shielding materials

Table 2 Electromagnetic noise solution results

Method	Amplitude (dBm)	Attenuation rate (%)
Ref	41	-
Ferrite core	35	14.6
Shield A	28	31.7
Shield B	21	48.7

를 3 V/m로 인가하는데 이는 전자파 노이즈 신뢰성 평가 규격에 따라 진행되는 값이다.

신뢰성 평가 진행 시 전기장의 세기/Duration Time 등 기준이 필요한데 실험 결과를 토대로 전기장의 세기 및 Duration time은 실제 설비 공정조건에 맞춰서 진행하였다^[6].

실험 결과 아래와 같이 현장에서 측정된 값과 재현성 평가의 영향성이 동일한 경향치가 나오게 되었고 이를 바탕으로 문제를 해결하기 위해선 측정된 주파수 차폐가 필요하다는 것을 알게 되었다. Fig. 7의 차폐 소재는 범용성을 가지는 Ferrite Core와 타 산업(우주 항공)에서 쓰이는 Shield Material 두 종류(a/b)로 차폐 영향성 평가를 시행하였다. Shield material은 다양한 금속으로 합성할 수 있는데 이번엔 Ag/Cu를 가지고 조성비를 변화하여 시제품을 만들었고, 감쇄율을 측정 계산하였다^[7].

Table 2와 Fig. 8에서 보는 것처럼 Microwave Plasma Source의 전자파 피해는 적절한 차폐 물질을 선정 시 효과적인 감쇄율을 가질 수 있다는 것을 알게 되었고, 주파수 분석과 적절한 Material 선정이 필요함을 알 수 있다. 전자파 차폐는 현재 범용적으로 알고 있는 Ferrite Core 외 Shield Material이 효과적임을 본 실험을 통해서 알 수 있었다. Shield Material은 금속 결합으로 이루어져 있으며 이를 직조 형태로 구성함에 따라 효과가 다르다. 특히 Shield A와 Shield B의 차이는 Ag/Cu의 성분비의 차이로 본 실험에선 Ag 성분이 Cu보다 15% 높았을 때 MW 차폐효과가 효과적임을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 반도체 Fab 환경에서 전자파로 인해 설비에 어떤 영향을 받는지 검증하고 이를 해결할 수 있는 Solution을 찾고자 하

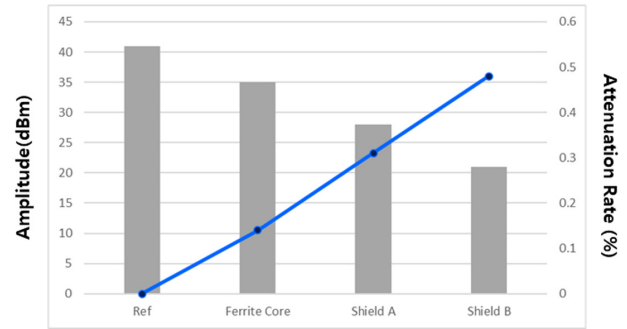


Fig. 8 Attenuation rate according to shielding solution

였다. 특히 선단노드로 갈수록 센서의 Hunting이 실 공정에 어떤 영향을 주고 공정 Output Performance까지 나빠진다는 것을 재현할 수 있었다. 이를 해결하기 위해선 실제 반도체 Fab 내 전자파 장애요소를 파악하고, 파악된 주파수 특성에 맞춰서 재현성 평가를 진행해야 한다. 재현성 평가를 통해 모델링한 문제가 가시화되면 적절한 Solution을 도입하여 해당 문제를 해결하는 방안을 고찰하게 된다.

본 실험에선 ALD 공정 설비를 기준으로 전자파 장애요소가 2.45 Ghz(MW 대역)임을 파악하였고, 전자파 노이즈 인가기를 통해서 압력 센서의 Hunting을 파악, Shield Material/Ferrite Core를 통해 적절한 해결안을 수립하였다. 특히 Shield Material은 반도체 Fab에선 최초로 사용하는 물질로 좀 더 다양한 실험을 통해서 MW Source 설비 및 차폐가 필요한 설비에 장착평가를 통해 다양한 상황에서의 영향성 평가가 필요하다. 이러한 일련의 결과물은 실제 반도체 Fab에서 적용가능한 Solution이며 특히 Display, 로봇, 배터리 분야 등 다양한 산업에 확대 적용할 수 있다는 장점이 있다.




마지막으로 IEC, CISPR 규격들은 현재 반도체 Fab 환경의 설비 인증에는 충분치 않다는 것이 다시 한번 여실히 드러났으며 향후 반도체 Chip 관련 신뢰성 시험뿐만 아니라 반도체 Fab을 구성하는 장비, OHT, 로봇 등에 EMC Report를 진행할 수 있는 실질적인 규격의 필요성에 대해서 여실히 이해하게 되었다. 반도체 Fab 환경을 평가할 수 있는 전자파 시험 규격은 앞으로 추가 연구과제로 삼을 예정이다.

후 기

This work was supported by K-CHIPS (Korea Collaborative & High-tech Initiative for Prospective Semiconductor Research) (2410012185) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

References

- [1] Bogdanovich, B. Y., Ignatyev, A. P., Senyukov, V. A., 1991, RF Pulses with Flat Output Waveform Generator in RF Power Upgrade System, Conference Record of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference, 2 1048-1050, <https://doi.org/10.1109/PAC.1991.164533>.
- [2] Kumar, S., 2012, Thermal Management of RF and Digital Electronic Assemblies Using Optimized Materials and PCB Designs, MILAERO007-Military and aerospace electronic news and information, <<https://www.magazines007.com/pdf/ASC-WP0312.pdf>>.
- [3] Gutmann, R. J., 1980, Application of RF Circuit Design Principles to Distributed Power Converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, IECI-27:3 156-164, <https://doi.org/10.1109/TIECI.1980.351669>.
- [4] Reuben, E. C., Li, Y., 2022, Using RF Generator As A Renewable Energy Source For Green Building Applications, 2022 4th International Symposium on Smart and Healthy Cities (ISHC), 41-46, <https://doi.org/10.1109/ISHC56805.2022.00018>.
- [5] Stoopman, M., Serdijn, W. A., Philips, K., A Robust and Large Range Optimally Mismatched RF Energy Harvester With Resonance Control Loop, 2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 476-479, <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2012.6272068>.
- [6] Yang, J., Lai, Y., Pan, K., Xu, J., Mikjaniec, T., Cain, S., Park, S., 2021, A Comparison Study of TIM Degradation of Phase Change Material and Thermal Grease, 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 1978-1983, <https://doi.org/10.1109/ECTC32696.2021.00312>.
- [7] Nnebe, I. M., Feger, C., 2008, Drainage-Induced Dry-Out of Thermal Greases, IEEE Transactions on Advanced Packaging, 31:3 512-518, <https://doi.org/10.1109/TADVP.2008.924231>.

	<p>Taehwan Kim Doctoral Student in Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interest is in Semiconductor Equipment Diagnosis. E-mail: jumbangy@gmail.com</p>
	<p>Taesun Hong Doctoral Student in Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interest is in Semiconductor Equipment Diagnosis. E-mail: hong4262@naver.com</p>
	<p>Min uk Lee Professor in Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interest is in Plasma Simulation. E-mail: min.uk.lee@mju.ac.kr</p>