



반도체 Fab에서 Ionizer 설치환경 변화에 따른 정전기제어 성능 연구

홍태선^a, 김태환^a, 이민욱^{a,*}

Effects of Ionizer Installation Conditions on Electrostatic Control Performance during Semiconductor Fabrication

Taesun Hong^a, Taehwan Kim^a, Min uk Lee^{a,*}

^a Department of Semiconductor Engineering, Myongji University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 August 2025
Revised 4 September 2025
Accepted 24 September 2025

Keywords:

Electrostatic discharge
Corona ionizer
Wafer defect
Via blockage
Particle-induced short

ABSTRACT

Electrostatic discharge and particle contamination caused by static electricity contribute to yield loss during semiconductor manufacturing. Using insulating materials in process equipment causes static charge accumulation. Even small amounts of static charge can severely damage metal lines, gate oxides, or insulating layers. Although corona ionizers are widely adopted to control such issues, their performance is highly sensitive to installation conditions, including the position, angle, distance, and airflow. Improper conditions cause ion imbalance, fuzzball particle formation, and metal spattering, potentially leading to wafer defects that reduce the overall yield. Here, the correlation between fuzzball particles and wafer defects is verified using scanning electron microscopy and defect mapping. Root causes are identified and optimization strategies are suggested by evaluating ionizer installation angles and offsets within equipment front end modules and quantitatively measuring charge and discharge performance. The results provide foundational data for standardizing ionizer installation and improving process yields .

1. Introduction

반도체 제조공정은 극도의 청정도와 정밀도를 요구하며, 그중 정전기 방전(Electrostatic Discharge, ESD)은 제품 수율 저하와 신뢰성 문제를 유발하는 주요 요소로 꼽힌다.

특히 소자의 고집적화 및 미세화가 진행됨에 따라, 수십 볼트(V) 수준의 정전기만으로도 게이트 산화막 손상, 금속 배선 열화, 잠복 결함 등이 7 nm 이하 공정에서 발생할 수 있다(Fig. 1).

또한 정전기는 Particle의 이탈 및 재부착에도 영향을 미쳐 Wafer 오염과 패턴 결함을(패턴 막힘, 비아홀 폐색, 쇼트) 유발함

으로써 공정 수율을 위협한다^[2](Fig. 2).

이를 제어하기 위해 공정 전반에 Corona 방식 Ionizer가 널리 활용되고 있지만, 설치 위치나 각도, 기류 조건 등이 장비사별로 표준화되어 있지 않다는 점이 제전 성능의 편차와 역대전, Particle, Fuzzball 형성^[3] 등의 문제를 초래하고 있다. 특히 Equipment Front End Module(EFEM)과 Chamber가 이중 조사에 의해 구성되는 구조적 특성상 Corona 방식 Ionizer는 현장 판단에 따라 설치되어, 동일 Fab 내에서도 비일관적으로 운용되는 실정이다.

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

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

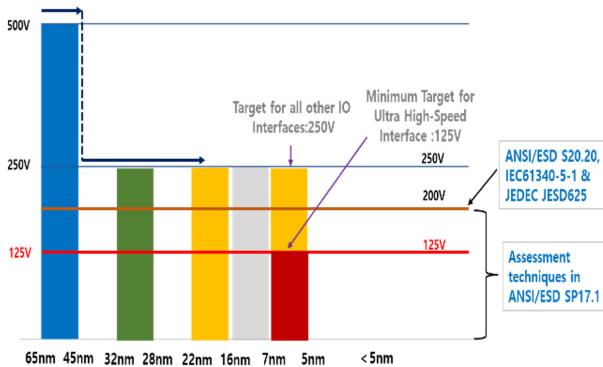


Fig. 1 Charged device model (CDM) threshold level and control level^[1]

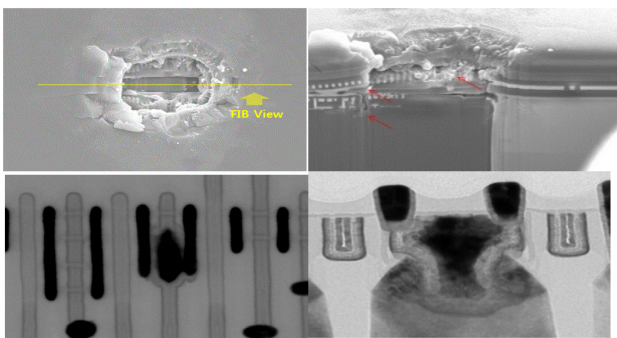


Fig. 2 Images of tunnel pit (top) and burnt (bottom) caused by ESD

2. Experiment

2.1 Experimental Objective

본 연구는 반도체 제조 환경에서 Corona 방식 Ionizer의 설치 조건이 정전기 제거 성능과 Wafer 오염 위험도에 미치는 영향을 실증적으로 검증하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 EFEM내 Fan Filter Unit(FFU)를 통해 상부에서 하부로 흐르는 Laminar Flow 환경을 구성하고, 식 (1)에서와 같이 이온수송 방정식 중 대류 항($\nabla \cdot (nu)$)을 적용하여 이온의 대류적 이동 특성을 이론적으로 고찰하였다^[4].

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot (nu) + \nabla \cdot (D\nabla n) \mp S \quad (1)$$

U : 공기 유동의 속도 벡터, D : 이온의 확산 계수

$\frac{\partial n}{\partial t}$: 시간에 따른 이온 농도 변화율

$\nabla \cdot (nu)$: 공기 유동에 의해 이온 이동하는 효과

더불어 Computational Fluid Dynamics(CFD) 기반의 시뮬레이션 수행하여 Corona 방식 Ionizer에서 방사된 이온이 실제 공기 흐름을 따라 어떻게 확산되는지, 그리고 구조물이나 장

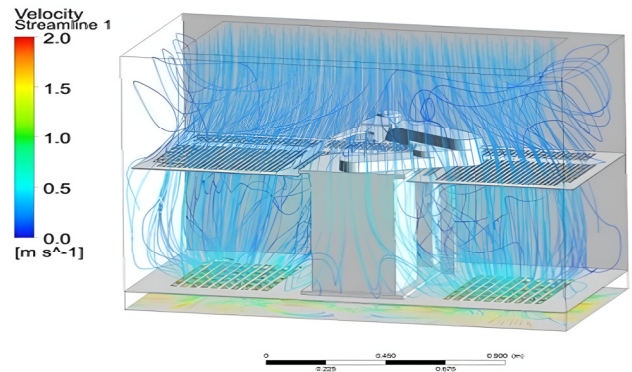


Fig. 3 Airflow analysis in EFEM

비 배치에 따라 정전기 제어 성능이 어떻게 변화하는지를 분석하였다.

시뮬레이션 결과, EFEM 내부 구조물에 의해 이온의 확산 경로가 차단되거나 편향되며, 하부 영역에는 이온이 충분히 도달하지 못하는 음영 영역이 형성됨을 확인하였다. 특히 양측 벽면에서는 기류 불균형으로 인한 와류가 발생하여, 이온의 흐름이 정체되거나 특정영역에 집중되는 현상이 관찰되었다. 이와 같은 이온 분포의 불균일성은 정전기 제거 성능 저하 및 Particle 증가로 이어질 수 있으며, 이는 Ionizer의 설치 위치와 방사 각도 변화가 제전 성능에 유의미한 영향을 미친다는 가설을 뒷받침하는 실증적 근거가 된다(Fig. 3).

2.2 Experimental Setup and Conditions

2.2.1 실험 환경

본 실험은 반도체 제조공정 내 가동 중인 설비 대상 EFEM내 FFU가 장착된 Laminar Airflow 환경에 실제 설치된 Corona 방식의 Ionizer 1,725대 대상 위치와 각도 등을 연구 표본으로 설정하였다.

Table 1은 실제 Fab 내 운영 중인 반도체 장비에 부착된 Corona 방식의 Ionizer의 위치 및 방사 각도를 조사하여 유형별로 정리한 것이다(Fig. 4).

2.2.2 주요 측정 항목

Corona 방식의 Ionizer의 정전기 제거 성능을 평가하기 위해 다음과 같은 측정 항목을 중심으로 분석을 수행하였다.

첫째, Decay Time은 IEC 61340-5-1 국제 표준에 따라 +1000 V의 초기 전하가 +100 V 이하로 감소하는데 소요되는 시간을 기준으로 측정하였다. 이 항목은 정전기 중화 속도를 나타내는 주요 지표로, Corona 방식의 Ionizer의 성능을 정량적으로 평가하는 데 활용된다.

둘째, Ion Balance는 Chargo Plate Monitor(CPM) 위치에서

Table 1 Ionizer installation environment in EFEM (position, angle)

Installation position	Left(load port)			Center(FFU)			Right(chamber)		
	0	-15°	-35°	0	-15°	-30°	0	15°	45°
Emission angle	0	-15°	-35°	0	-15°	-30°	0	15°	45°

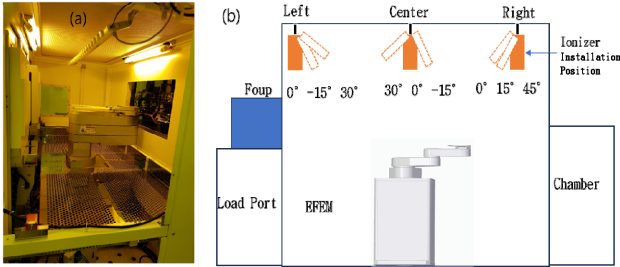


Fig. 4 (a) Actual installation of the Ionizer inside the EFEM, (b) ionizer installation positions and emission angles



Fig. 5 Status of static elimination performance evaluation in EFEM using CPM

측정된 이온 전위의 편차를 의미하며, ± 30 V 이내의 균형 상태를 유지하는지를 기준으로 안정성을 평가하였다. 이 값이 기준을 초과할 경우, 불균형한 이온 분포로 인해 역대전 등의 문제가 발생할 수 있어 중요한 품질 판단 요소이다.

셋째, 모든 실험 조건은 신뢰도 확보를 위해 3회 이상 반복 측정을 수행하였으며, 각 반복 측정값의 평균을 산출하여 분석에 활용하였다. 이를 통해 조건별 정전기 제거 성능의 일관성과 재현성을 함께 검토하였다.

2.2.3 측정 장비

정전기 제거 성능과 EFEM 내 기류 상태를 정량적으로 분석하기 위해 다음과 같은 측정 장비를 활용하였다. CPM은 Corona 방식의 Ionizer의 정전기 제거 성능을 정량적으로 평가하기 위한 주요 측정 장비로 사용되었다(Fig. 5).

CPM은 일정 전압으로 충전된 금속판에서 전하가 제거되는 시간을 측정함으로써, Corona 방식의 Ionizer의 Decay Time 및 Ion Balance를 정밀하게 분석할 수 있도록 한다. 또한, 풍속계(anemometer)는 EFEM 내부의 기류 분포를 확인하기 위해 활용

Table 2 Results of static elimination performance evaluation according to angle

Installation position	Left(load port)			Center(FFU)			Right(chamber)		
	0	-15°	-35°	0	-15°	-30°	0	15°	45°
Discharge performance	120V	93V	71V	30V	68V	105V	205V	110V	98V

Table 3 Results of static elimination performance evaluation according to target distance

Discharge distance	10 cm	50 cm	70 cm
Decay Time	5 s	8 s	13 s
Ion Balance	± 120 V	± 30 V	± 110 V

되었다. 기류의 속도와 방향은 이온의 전달 효율에 큰 영향을 미치기 때문에, 풍속계를 통해 EFEM 내에서 Laminar Airflow가 적절하게 유지되고 있는지를 확인하고, 와류나 기류의 불균형 여부를 파악하였다. 이를 통해 Corona 방식의 Ionizer 설치 위치 및 방사 각도에 따른 기류 영향도 함께 고려하였다.

Fig. 5는 CPM을 이용한 EFEM내부에 설치된 Ionizer의 Decay Time 및 Ion Balance를 측정하였다.

3. Results

본 연구에서는 반도체 제조 Fab 내에서 Corona 방식의 Ionizer 설치 조건이 정전기 제어 성능에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 실험 결과, 설치 각도, 위치, 대상체와의 거리, 그리고 FFU 기류 조건 등 다양한 요소가 정전기 제거 성능에 유의미한 영향을 미치며, 일부 조건에서는 오히려 역대전 현상 및 Particle 위험이 증가할 수 있음이 확인되었다.

3.1 제전 성능에 영향을 주는 설치 조건 분석

Corona 방식의 Ionizer의 제전 성능은 설치위치와 방사각도, 그리고 대상체와의 거리에 따라 현저한 차이를 보였다.

실험결과에 따르면 EFEM Center 0°와 같은 직각(수직) 방사 조건에서는 Decay Time이 10 s 이내, Ion Balance ± 30 V 이내로 안정적으로 유지되었으나, 방사각도 30° 이상 기울어진 조건에서는 이온의 도달량이 급감하며, Ion Balance ± 50 V 이상의 편향과 함께 역대전 위험이 증가하는 경향을 보였다(Table 2).

특히 FFU 기류가 이온의 도달 경로를 방해하거나, 제전 성능이 국소적으로 급감하였다. 이는 이온 분포의 불균형을 초래해 금속 Spattering, Particle 증가 등을 유발할 수 있는 기반이 된다.

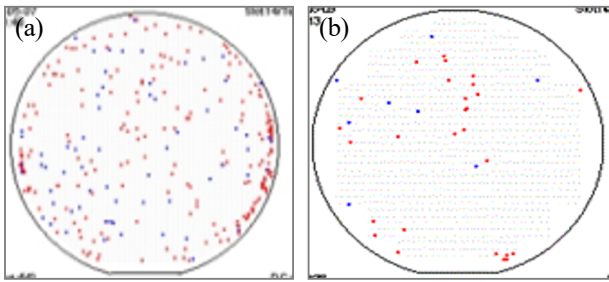


Fig. 6 (a) Particle count in reverse ion balance environment, (b) particle count in optimal condition environment

한편, Corona 방식의 Ionizer와 대상체 간의 거리 실험에서는 거리 50 cm 이내의 설치시 Decay Time 8 s, Ion Balance ± 30 V로 안정적 유지되었으며, 10 cm 근접한 설치는 빠른 제전(decay time 5 s)을 보였으나, ± 100 V 이상의 Ion Balance 편향이 나타나 역대전 위험이 크게 증가하였다. 반대로 70 cm 거리가 과도하게 먼 경우, 공기 중 이온 재결합(recombination) 현상이 발생하여 이온의 농도가 희석되고, Decay Time이 10s 이상으로 늘어나는 등 제전 효과가 저하되었다(Table 3).

특히 대상체 간 높이 차가 큰 장비 구조에서는 단일 Corona 방식의 Ionizer로는 제전 커버리지가 부족하였고, 다수의 국부 Corona 방식의 Ionizer 설치 필요성이 제기되었다.

결과적으로, 설치위치·방사각도와 대상체 거리는 Corona 방식의 Ionizer의 제전 성능에 결정적인 영향을 미치는 변수로, 설치 조건 최적화 없이는 균일하고 안정적인 제전 효과를 기대하기 어렵다는 결론을 도출할 수 있었다.

3.2 개선 사례

설치위치와 방사각도 및 전위 불균형의 영향으로 Wafer 이송 중 마찰, 접촉, 기류 변화 등 요인으로 수 KV까지 대전될 수 있으며, 이로 인해 EFEM 내부 Particle이 흡착되거나, 재비산되어 2차 오염을 유발할 수 있다.

EFEM내 Corona 방식의 Ionizer 설치 최적의 조건 시(Center, 0°, 50 cm) Decay Time과 Ion Balance가 유지되었고, Wafer 오염 측정 시 Particle이 86% 감소하는 것을 관찰하였다(Fig. 6).

이는 Corona 방식의 Ionizer 설치 조건과 밀접한 연관성이 있음을 입증하였다.

4. Conclusion

본 연구는 Corona 방식 Ionizer의 설치 조건이 제전성능과 오염 리스크에 미치는 영향을 각각도로 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다. 설치위치, 방사각도, 대상체거리, 기류 조건은 제

전 성능을 결정짓는 핵심 변수이며, 부적절한 조건에서는 오히려 역대전 현상이나 이온 음영 형성으로 인해 오히려 정전기 축적 및 Particle 증가하는 것으로 확인되었다.

또한 방사각도와 전위 불균형 역시 정전기 제어에 중대한 영향을 미쳤다. 방사각도가 기류 방향과 일치하지 않거나, 양극/음극 간 전위 비율이 부적절한 경우, 이온의 균형적 도달이 저해되었고, 이에 따라 Ion Balance 편차가 커지는 문제가 관찰되었다. 이는 양극/음극 전압조정, duty cycle 보정 등의 기술적 대응 필요성을 시사한다. 정전기 제어의 효과를 극대화하고 Particle 오염을 저감하기 위해서는 Ionizer의 설치 조건에 대한 구조적 최적화가 필요하며, 이와 함께 유지관리 기준의 정립이 요구된다. 끝으로 향후에는 Corona 방식 외에도 Soft X-ray^[5], VUV 기반의 비접촉형 Ionizer, Plasma Ionizer^[6] 도입 가능성을 병행 검토함으로써, 보다 정밀한 제전 성능과 오염 저감이 가능한 공정 환경 구축이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구의 결과는 Fab 내 Ionizer의 최적 설치 기준 마련, 공정 설계 개선, 설비 인증 및 품질 평가 체계 구축 등에 있어 기초 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

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] ESD Industry Council, 2021, White Paper 2 : A Case for Lowering Component Level CDM ESD Specifications and Requirements, <<https://www.esdindustrycouncil.org/ic/en/shared/industry-council-white-paper-2-rev3.0-may-2021-final.pdf>>.
- [2] Okano, K., Posadas, A., 1997, Article Generation of Ceramic Emitters for Cleanroom Air Ionizers, Proceedings Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium, 287-291, <https://doi.org/10.1109/ESESD.1997.634254>.
- [3] Hong, T., Lee, M., Youn, J., Hong, S., Kim, T., 2025, Study on the Correlation between Ionizer Fuzzball Generation and Electrostatic Discharge Control in Semiconductor Processes, Journal of the Semiconductor & Display Technology, 24:2 108-112.
- [4] Simco-Ion, 2012, Electrostatic Control and Ionization in the

Semiconductor Industry, Technical Papers & Technical Notes, <<https://technology-ionization.simco-ion.com/resources/technical-papers-technical-notes>>.

- [5] Jeong, P.-H., Lee, D.-H., 2017, A Study on the Optimal Design of Soft X-ray Ionizer using the Monte Carlo N-Particle Extended Code, Journal of the Korean Society of Safety, 32:2 34-37. <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2017.32.2.34>
- [6] Bae, B., Yoon, H., Hwang, H. -J., Kim, J., 2021, A Low-Voltage Microwave Plasma Ionizer Without Reduced Ionizing Performance Due to Particle Fuzzballs, 2021 43rd Annual EOS/ESD Symposium (EOS/ESD), 1-5, <https://doi.org/10.23919/EOS/ESD52038.2021.9574764>.



Taesun Hong

Doctoral Student in Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interest is in Electrostatics.

E-mail: hong4262@naver.com



Taehwan Kim

Doctoral Student in Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interest is Emi.

E-mail: jumbangy@gmail.com



Min uk Lee

Professor in Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interest is Plasma Physics.

E-mail: min.uk.lee@mju.ac.kr