

반도체 웨이퍼 제조공정 클린룸 구조, 공기조화 및 오염제어시스템

최광민^{1,*} · 이지은¹ · 조귀영² · 김관식³ · 조수현¹

¹삼성전자 건강연구소, ²삼성전자 분석기술팀, ³삼성전자 보건관리팀

Clean Room Structure, Air Conditioning and Contamination Control Systems in the Semiconductor Fabrication Process

Kwang-Min Choi^{1,*} · Ji-Eun Lee¹ · Kwi-Young Cho² · Kwan-Sick Kim³ · Soo-Hun Cho¹

¹Samsung Health Research Institute, Samsung Electronics Co. Ltd.,

²Analysis Science & Engineering Team, Samsung Electronics Co. Ltd.,

³Health Management Team, Samsung Electronics Co. Ltd.

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to examine clean room(C/R) structure, air conditioning and contamination control systems and to provide basic information for identifying a correlation between the semiconductor work environment and workers' disease.

Methods: This study was conducted at 200 mm and 300 mm semiconductor wafer fabrication facilities. The C/R structure and air conditioning method were investigated using basic engineering data from documentation for C/R construction. Furthermore, contamination parameters such as airborne particles, temperature, humidity, acids, ammonia, organic compounds, and vibration in the C/R were based on the International Technology Roadmap for Semiconductors(ITRS). The properties of contamination control systems and the current status of monitoring of various contaminants in the C/R were investigated.

Results: 200 mm and 300 mm wafer fabrication facilities were divided into fab(C/R) and sub fab(Plenum), and fab, clean sub fab and facility sub fab, respectively. Fresh air(FA) is supplied in the plenum or clean sub fab by the outdoor air handling unit system which purifies outdoor air. FA supply or contaminated indoor air ventilation rates in the 200 mm and 300 mm wafer fabrication facilities are approximately 10-25%. Furthermore, semiconductor clean rooms strictly controlled airborne particles($\leq 1,000 \text{ #/ft}^3$), temperature($23 \pm 0.5^\circ\text{C}$), humidity($45 \pm 5\%$), air velocity(0.4 m/s), air change($60\text{-}80 \text{ cycles/hr}$), vibration($\leq 1 \text{ cm/s}^2$), and differential pressure(atmospheric pressure + $1.0\text{-}2.5 \text{ mmH}_2\text{O}$) through air handling and contamination control systems. In addition, acids, alkali and ozone are managed at less than internal criteria by chemical filters.

Conclusions: Semiconductor clean rooms can be a pleasant environment for workers as well as semiconductor devices. However, based on the precautionary principle, it may be necessary to continuously improve semiconductor processes and the work environment.

Key words: air conditioning, clean room structure, contamination control system, semiconductor work environment

I. 서 론

첨단산업분야의 연구개발과 생산과정에서 중대한 방해를 초래하는 공기 중 입자(먼지) 및 세균을 제거하기 위해서는 클린룸(Clean room, C/R)이라는 청

정 환경이 필요하다. C/R이란 공기에 포함된 먼지의 개수가 규정된 한도 내에서 관리되는 일정영역이나 공간(Standard, 1992), 또는 먼지를 비롯한 제반 환경 조건인 온도, 습도, 풍속, 차압, 각종 오염 등이 일정 규격에 맞게 유지, 관리되는 깨끗한 영역(ISO, 1999)

*Corresponding author: Kwang-Min Choi, Tel: +82-31-209-1206, E-mail: k.m.choi@samsung.com

Samsung Health Research Institute(SHRI), 95, Samsung 2-Ro, Giheung-Gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do, 446-811, Korea

Received: April 8, 2015, Revised: June 8, 2015, Accepted: June 9, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

으로 정의된다. C/R은 사용 목적에 따라 크게 산업용 C/R(Industrial clean room)과 생물학적 C/R(Biological clean room)으로 분류할 수 있다. 산업용 C/R은 생산 제품에 영향을 미치는 먼지 등 분진 제거를 목적으로 하는 C/R으로 정밀산업과 전자산업을 기초로 발달하기 시작하였으며, 현재는 반도체 산업뿐만 아니라 정밀기기, 광학기기 제조·조립 등에 널리 사용되고 있다. 특히 반도체 제조 C/R에서는 0.1 μm 크기의 먼지 입자와 미생물까지도 제거된다. 생물학적 C/R은 공기 중에 부유한 미생물 분진 제거를 목적으로 하는 C/R으로 병원, 제약회사, 식품제조 등에 이용되고 있다.

인체는 분진 발생원으로서 입고 있는 의복 및 호흡으로부터 분진이 발생하며, 기침 또는 재채기만으로도 수 미터 사방으로 비산이 가능하다. 따라서 반도체 산업에 종사하는 작업자는 C/R 입실 시에 방진 마스크의 착용이 필요하며, 그 외에도 방진모, 방진복, 방진화, 방진장갑 등을 착용하게 된다(Whyte, 2001). 그 이후에도 에어 샤워실을 통과함으로써 최종적으로 C/R에 입실 가능하게 된다. 분진 외에도 온도, 습도, 풍속, 산, 암모니아, 유기물, 오존, 금속(중금속 및 알칼리금속), 소음, 진동, 정전기, 초순수 등이 반도체 주요공정, 예를 들면 확산(Diffusion), 포토(Photolithography), 이온주입(Ion Implantation), 식각(Etch), 메탈(Metallization), 세정(Clean) 공정의 생산 및 수율에 영향을 미치는 오염인자로 알려져 있다(Ohmi, 1995). 따라서 다양한 제어시스템의 적용을 통해 이러한 인자들을 일정 규격 이하로 관리함으로써 반도체 생산에 적합한 C/R 환경을 유지할 수 있다.

최근 국내 반도체 산업에 종사하는 근로자에게서 백혈병, 재생불량성 빈혈, 림프조혈기계 암 등의 질병이 발생함에 따라 반도체 제조환경이 입자, 온도, 습도, 차압, 산, 염기, 유기물 등의 오염인자를 극도로 제어한 초청정 C/R 입에도 불구하고, 작업환경에 대한 보건관점에서의 안전성 또는 유해성 여부에 관심이 고조되고 있으며, 작업환경에서의 가스·화학물질과 같은 화학적 인자 및 비전리방사선 등과 같은 물리적 인자 등에 대한 노출평가 및 역학조사에 대한 연구가 보고되고 있다(Kim et al., 2011; Lee et

al., 2011; Park et al., 2011; Chung et al., 2012; Park et al., 2012; Park et al., 2011; 2012; 2014).

하지만 작업환경에서의 화학적 및 물리적 유해인자 노출과 작업자 질병 발생과의 상관성이 거의 입증되고 있지 않는 상황에서도 반도체산업 작업환경의 유해성에 대해 다양한 추론이 지속되고 있다. 따라서 반도체 작업환경과 질병과의 상관성 확인 관련 명확한 지견을 얻기 위해서는 반도체 공정 및 유해인자에 대한 고찰(Park et al., 2011) 뿐만 아니라, 작업환경인 C/R에 대한 이해도 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 반도체가 제조되는 환경이면서도 작업자의 근무환경인 C/R의 구조, 공기조화, 오염제어시스템 특성 및 오염관리 현황 등의 확인을 통해, 반도체 제조 C/R을 이해하고, 작업자 보건관점에서 고찰함으로써 반도체 산업에서의 작업자 건강장해와 작업환경과의 연관성 규명에 필요한 기초 정보를 제공하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

본 연구는 경기도 기흥에 위치하고 있는 시스템 LSI(Large Scale Integrated Circuit) 제품을 생산하는 200 mm 및 300 mm 반도체 웨이퍼 제조 사업장(라인) 각 1개씩을 대상으로 라인 및 C/R 구조, 공기조화시스템, 반도체 공정불량 발생 오염 종류, 관리기준, 제어시스템 및 모니터링 현황을 확인하였다.

2. 연구방법

C/R 구조 및 공조방식은 라인 건설 시 제시된 BED(Basic engineering data)에 기초하여 조사하였다. C/R 내에서 웨이퍼에 불량을 유발시킬 수 있는 오염인자 및 공정불량 내용은 국제 반도체 기술 로드맵(International Technology Roadmap for Semiconductor, ITRS) 및 실제 라인에서 발생하는 주요 공정불량을 조사하여 기술하였다. 오염제어시스템 특성, C/R 내 오염농도 측정 및 모니터링 현황은 현재 라인에서 적용/운영되고 있는 시스템 및 관리현황을 조사하였다. 오염농도 측정 및 모니터링에 사용되는 장비, 측정주기 등에 대한 세부내용은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Principal parameters and measurement instruments in the semiconductor clean room

Classifications	Unit	Measurement interval	Monitoring tool(Model, Maker, Nation)
Particle	particles/ft ³	1 sec	Lsair110-2, PMS, USA
Temperature	℃	1 sec	Vaisala, HMI70, Pinland
Humidity	%	1 sec	Vaisala, HMI70, Pinland
Air velocity	m/s	1 sec	Kanomax, A541, Japan
Differential pressure	mmH ₂ O	Off-line	Furness Controls, FCO520, UK
Acid	ppb	25 min	HAM-A200, Withtech, Korea
Ammonia	ppb	5 min	HAM-F300, Withtech, Korea
Organics	ppb	1 min	THC, KIMODO, Japan
Ozone	ppb	5 sec	OA683, KIMODO, Japan
ESC*	V/inch	Off-line	775, Ion System, USA
Vibration	cm/sec ²	Off-line	3233A, Signallink, Koran

* ESC: Electro static discharge

III. 연구결과

1. 라인 및 클린룸 구조

일반적으로 반도체가 제조되는 건물을 라인(Line)이라고 하며, 라인의 구조는 크게 FAB(C/R) + Sub FAB(Plenum)의 2층 구조(Figure 1a) 또는 FAB + Clean Sub FAB(CSF) + Facility Sub FAB(FSF)의 3층 구조(Figure 1b)로 되어있다. 여기서, FAB은 반도체 공정이 진행되는 곳인 C/R으로서 대부분의 작업자가 작업을 수행하며 생산설비의 가동 및 유지보수가 이루어지는 영역이다.

Sub FAB은 생산설비에 가스 및 화학물질 등 공정에 필요한 화학물질 등을 제공하고 공정 진행 후 잔여 화학물질을 제거(배기)하는 부대설비 등이 위치해 있는 공간으로 CSF(1st Plenum)과 FSF(2nd Plenum)으로 구분할 수 있다. 200 mm 이하의 웨이퍼 제조 라인은 FAB + Sub FAB 구조이며, 최근 생산효율을 증대시키기 위해 웨이퍼 크기가 300 mm로 커지면서 장비밀도도 함께 커짐에 따라 Sub FAB을 2개 층으로 분리한 FAB + CSF + FSF 구조를 채택하고 있다. FAB + Sub FAB 구조는 설비 확장 및 Lay-out 변경시 유연성이 좋고, 부대설비 유지보수 시 접근 및 작업 편의성이 좋으며, 건설비용 절감 및 공사기간이 짧다는 장점이 있다. 한편, FAB + CSF + FSF 구조는 건설비용 증가 및 공사기간 연장 등의 단점이 있는 반면, 오염 및 발열의 원인이 될 수 있는 scrubber,

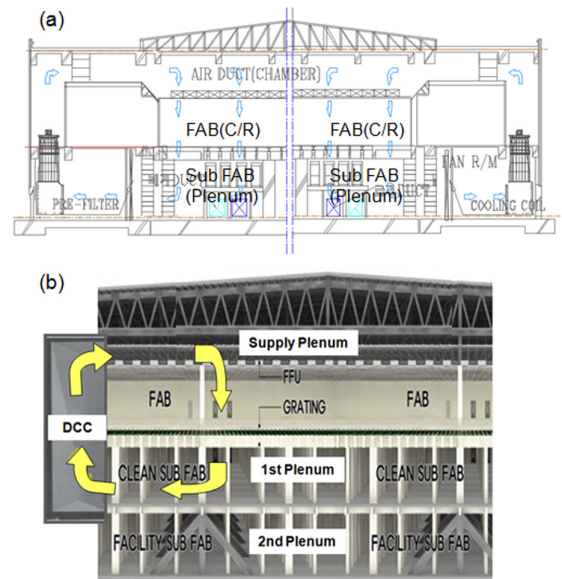


Figure 1. 200 mm and 300 mm clean room structure:(a) FAB (C/R) + Sub FAB(Plenum), (b) FAB + Clean Sub FAB(CSF) + Facility Sub FAB(FSF)

pump, chiller 등 부대설비를 FSF에서 운영함으로써 C/R과 구획할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

2. 공기조화

입자, 온도, 습도, 기류, 진동, 오존, 유기물 등은 반도체 공정에 따라 제품 수율 등에 영향을 주기 때문에, C/R 내로 공급되는 외기 및 내부에서 순환되는

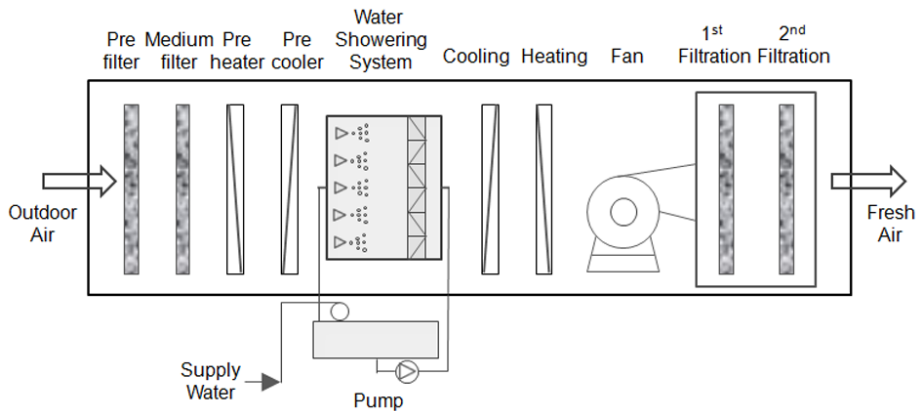


Figure 2. OAHU(Out air handling unit) system

공기(Return air, RA)는 반도체 제조에 적합한 규격으로의 제어가 필요하다. Figure 2는 반도체 산업에 적용되고 있는 외기조화기(Out air handling unit, OAHU) 시스템을 나타낸 것으로, 외부공기는 Pre-filter, Medium-filter, Pre-heater, Pre-cooler, Water showering system, Cooling, Heating, 1st filtration(O_3+NO_x 제거), 2nd filtration(입자 제거) 과정을 거치면서 정제된 공기(Fresh air, FA)로 만들어진다.

FA는 plenum(CSF, Return plenum)으로 공급되며, 내부에서 순환되는 공기인 RA와 혼합되어 dry cooling coil(DCC) 단에서 규격에 맞는 온도로 제어된 뒤 supply plenum을 거쳐 C/R으로 유입되는데 이때 공기 흐름 상태는 top down 방식의 층류(Figure 1a) 또는 부분적 난류이다(Figure 1b).

C/R 내 공기는 기류를 따라 작고 균일한 원형으로

타공된 바닥 패널(Access floor panel)을 통과하여 plenum으로 이동하게 된다. 이곳에서 C/R 구조에 따라 약 10-25%의 공기는 산, 알칼리, 유기 및 열배기 형태로 외부로 배기되며, OAHU 시스템으로부터 공급된 FA는 RA와 다시 혼합되어 공기조화가 이루어진다.

Table 2는 200 mm 및 300 mm 반도체 웨이퍼 제조 C/R 을 공기조화 관점에서 비교한 것이다. 200 mm 및 300 mm 반도체 C/R 구조 및 C/R 내 입자에 대한 관리기준이 다르기 때문에 공기조화 시스템에서도 차이를 보이는데, 청정도 및 FA 공급비율에서 주요한 차이점을 가지며, 그 외 온도, 습도, 풍속, 차압 등의 관리기준은 모두 동일하다. 200 mm 반도체 C/R의 경우 웨이퍼는 카세트(Cassette) 캐리어에서 보관되며 공정 진행 시간 동안을 제외하면 대부분

Table 2. Principal control parameters and their management criteria of 200 mm and 300 mm semiconductor wafer clean room

Classifications	Unit	200 mm C/R		300 mm C/R	
		Bay [†]	S/A [‡]	Bay	S/A
Temperature	℃	23±0.5		23±0.5	
Relative humidity	%	45±5		45±5	
Air velocity	m/s	0.32-0.48		0.32-0.48	
Differential pressure	mmH ₂ O	atmospheric pressure + ≥0.5		atmospheric pressure + ≥0.5	
Cleaness [*]	particles/ft ³	1	1,000	1,000	1,000
FA flow ratio	%	8-10		20-25	
Number of air changes	cycles/hr	60-80		60-80	

^{*}particle size ≥ 0.1 μm. [†]Bay is working area, where workers operate tool and transport wafers. [‡]S/A is service area, where technicians and engineers perform maintenance

공기와 접촉이 가능하기 때문에 Class 1(0.1 μm 입자가 ft³당 1개 이하)으로 관리된다. 한편, 300 mm 반도체 C/R은 웨이퍼를 FOUP(Front opening unified pod)이라는 반밀폐형 캐리어에서 보관하기 때문에 공기와의 접촉 가능성이 낮아 Class 1,000(0.1 μm 입자가 ft³당 1,000개 이하)으로 관리되고 있다. C/R 운전에는 상당한 전력이 필요하기 때문에, 최근에는 웨이퍼가 공기 중에 노출되는 가장 중요한 공간만 청정도를 높이고, 그 외에는 청정도를 낮춘 국소클린 방식을 채용하고 있다. C/R 공기 질 관리에 중요한 인자라고 할 수 있는 FA 공급비율은 200 mm와 300 mm 반도체 C/R에 있어서 또 하나의 차이점이다. 200 mm 및 300 mm 반도체 C/R의 경우 FA 공급비율은 10% 및 25%로 각각 관리되고 있으며, 환기횟수는 시간당 60-80 회로 운영함으로써 C/R 환경에 적합한 청정한 공기 질을 유지, 관리하고 있다. 최근 생산량 증가 및 원가 절감을 위한 C/R retrofit에 의해 기존의 일부 200 mm 웨이퍼 제조용 FAB은 300 mm 웨이퍼 제조용 FAB으로 전환되어 청정도를 포함한 모든 관리기준이 300 mm FAB과 동일하게 유지되고 있다.

3. 오염인자 및 공정영향

반도체 제조 C/R에서 제품 수율(전체 제품 수에 대한 정상 제품의 비율)에 영향을 미치는 오염인자로는 입자, 온도, 습도, 차압, 산, 암모니아, 유기물, 금속(중금속 및 알칼리금속), 오존, 정전기, 진동 등

이 있으며, 제품 불량은 제품 및 오염의 종류에 따라서 다양하게 나타나는데, 회로의 전기특성과 같은 직접적인 영향 뿐 아니라, 부식 및 도포 밀착성 불량 등의 장애도 발생된다(Table 3). 따라서 제품 불량 발생을 사전에 방지하기 위해 이들 오염인자들을 각 공정 및 제품에 적합한 규격으로 관리하여야 한다.

반도체 소자는 집적도가 높아질수록 회로의 선폭은 점점 작아지며, 이에 따라 요구되는 입자 관리 크기도 작아진다(Wilson, 2013). 입자는 산화막 형성 공정에서는 막의 성장을 방해 또는 가속화하며, 포토공정에서는 bridge 및 open 불량을 유발하고, 이온주입공정 및 확산공정에서는 masking으로 작용하며, 식각 공정에서는 식각불량을 초래하는 등 defect density를 높이는 중요한 요인이다. C/R에서의 온도는 작업자의 활동조건(쾌적성) 및 각 공정 특성변화에 영향을 미친다. 특히 포토공정은 초 항온성이 요구되는데 이것은 포토마스크, 웨이퍼 및 기타 기계부의 열팽창이 문제가 되기 때문이다. 또한 감광성 물질(PR)의 물성 변화에도 영향을 주며, 공간분포에서 온도가 불안정할 경우 열영동 효과에 의한 C/R 내 기류이동을 초래함으로써 입자의 확산을 유도하는 인자로 작용한다. 습도가 높으면 흡수하기 쉬운 입자가 여러 부분의 표면에 모아져 부식을 일으키는 원인이 되며, 모세관 현상으로 인한 입자의 부착능력 강화로 쉽게 제거되지 않는다. 그리고 포토공정 중 웨이퍼 표면에 PR의 원치 않는 들뜸 현상이 발생하여 불량을 유발한다. 반면 습도가 낮을 경우 절연물이나 기타 부분

Table 3. Main contaminants affecting the yield of semiconductor wafer and their process effects

Contaminant	Process	Main process defect
Particle	Photolithography, Etch etc.	Bridge and open defect, Etch defect
Temperature	Photolithography	Thermal expansion, PR property variation
Air velocity, humidity, Differential pressure	All processes	Surface contamination, Film property change
Acid(F, Cl, SO _x ,NO _x)	Metallization	Metal corrosion, Lens haze
Alkali(NH ₃)	Photolithography	PR sensitivity T-top, Critical dimension(CD)-variation, Lens haze
Organics(> BP 150℃)	CVD Photolithography	Film growth obstruction Lens haze
Ozone(O ₃)	Diffusion	Oxide film depth default
Electro static discharge	Metallization	Metal connection defect(by spark), Particle deposition on wafer surface
Vibration	Metrology inspection	Pattern default(by miss-align) Inspection quality(data reliability ↓)

에 정전기가 발생하여 대전된 입자가 달라붙으며 회로 및 막질을 파괴하므로 적절한 수준의 관리가 요구된다.

풍속 및 기류는 C/R에서 지속적으로 발진되는 입자를 신속히 제거하고 서로 다른 청정 영역 간 Positive 기류를 확보하여 청정도를 관리하는 인자인데, 관리가 제대로 되지 않을 경우 풍속 불균형에 의한 역기류 형성, 설비 내 기류 유입으로 각종 오염에 의한 불량발생, 풍속변화 시 생산설비 및 웨이퍼의 표면 특성을 변화시켜 표면 오염, 막질 특성 변화에 직간접적으로 영향을 줄 수 있다. 차압은 C/R 오염을 가장 큰 폭으로 변화시키는 인자이다. C/R에서 입자 유입을 방지하기 위한 수단이며, 기류를 수반하여 외부로부터 먼지나 오염 입자들이 내부로 들어가지 못하도록 하기 때문에 차압 관리의 중요성이 반도체 산업에서 상당히 크다고 할 수 있다.

산(HF, HCl, HBr, H₂SO₄, HNO₃ 등) 및 알칼리(NH₃)는 메탈 및 포토공정에서 금속배선부식 및 배선 저항상승, T-top, CD(Critical dimension)-variation 및 Lens haze 등 공정 및 설비 특성에 악영향을 미치는 인자이므로 수 ppb 또는 sub ppb로의 제어가 필요하다(Wilson, 2013). 오존은 특히 확산공정에서 웨이퍼

표면에 자연산화막을 성장시켜 산화막 Depth 불량을 초래하기 때문에 외기 오존 농도가 높아지는 하절기에 특별 관리가 요구되어 진다. 정전기(ESD)는 스파크 발생을 유도하여 메탈공정의 금속배선 불량을 야기하며, 웨이퍼 표면에서의 입자 부착의 원인이 된다. 진동은 포토공정의 노광 시 miss-align에 의한 패턴불량을 유발하며, 전자현미경과 같은 검사장비의 측정 quality를 떨어뜨려 데이터 신뢰성이 결여된다. 또한, 건물자체 및 내부 시설물의 micro vibration은 자체발진을 유도하여 입자가 발생하며 설비의 고장, 열화를 초래하는 원인이 되기 때문에 C/R 설계 시에 지진 및 각종 진동에 영향을 받지 않도록 면밀한 검토가 필요한 오염인자이다.

4. 오염 제어시스템 및 관리현황

ITRS에서는 향후 반도체 기술 동향을 예측하고 반도체 및 관련 산업이 발전해 나가기 위한 기술적인 과제와 해결책을 명시하고 있다. 반도체 제조 C/R은 ITRS에서 제시하고 있는 오염물질 별 관리수준에 근거하여 유지 및 관리되고 있으며, 200 mm 및 300 mm 웨이퍼를 제조하는 라인의 주요 오염인자에 대한 관리기준 및 농도현황을 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Management concentrations of various contaminants in 200 mm and 300 mm semiconductor wafer manufacturing workplace*

Classifications	Management Criteria (unit)	200 mm C/R			300 mm C/R		
		Min	Max	Avg.±SD	Min	Max	Avg.±SD
Particles ^a	1-1000 particles/ft ³	0	110	0.0±0.3	0	6967	0.3±12.9
Temperature ^b	23±0.5 °C	23.1	23.3	23.1±0.0	22.9	23.2	23.1±0.0
Humidity ^c	45±5%	43.0	43.8	43.5±0.1	43.3	46.4	44.2±0.5
Air velocity ^d	0.32-0.48 m/s	0.36	0.44	0.40±0.02	0.36	0.44	0.40±0.02
Differential pressure ^e	AP + ≥0.5 mmH ₂ O	1.0	2.5	ND	1.0	2.5	ND
F	3 ppb	0.2	1.0	0.4±0.1	0.4	2.1	0.7±0.3
Cl	1 ppb	0.1	0.2	0.2±0.0	0.1	0.1	0.1±0.0
Acid ^{f†}	Br	0.1	0.2	0.1±0.1	0.1	0.1	0.1±0.0
	SO ₄	0.1	0.1	0.1±0.0	0.1	0.1	0.1±0.0
	NO ₂	0.1	1.2	0.4±0.2	0.8	3.2	1.7±0.4
NH ₄ ^{g‡}	10 ppb	0.1	1.3	0.8±0.1	0.0	2.8	0.8±0.6
O ₃ ^h	5 ppb	0.0	1.3	0.4±0.1	0.0	1.7	0.4±0.1
Vibration ⁱ	≤ 1 cm/s ² (zero-peak value)	0.01	0.12	-	0.01	0.15	-

*Monitoring period is January 1 to December 31, 2014; †Monitoring for acid components is performed in metallization process areas; ‡Monitoring for ammonium ion is performed in photolithography process areas; AP means atmospheric pressure

C/R 내 공기(FA + RA)중에 포함된 입자를 관리기준(Class 1-1000) 이하로 유지하기 위해 return plenum 및 supply plenum에 입자 제어 필터(Air filter)인 pre-filter(0.3 μm 이상 입자, 중량법 기준으로 40-80% 제거) 및 ULPA(Ultra low penetration air, 0.1 μm 입자 99.9999% 이상 제거) 필터가 설치되어 있다. C/R 내 입자는 천장 ULPA 필터 하부 약 30 cm에서 실시간으로 모니터링 되는데, 200 mm FAB에서는 웨이퍼가 Bay에서만 공기 중 open되기 때문에 모니터링 지점은 Bay이며, 300 mm 웨이퍼 제조 FAB의 경우 FOUP을 사용하기 때문에 Bay 및 S/A 구분이 없어 자동반송시스템의 간섭을 받지 않는 S/A에서 모니터링이 되고 있다. 불규칙적으로 발생하는 일회성 또는 일시적인 농도 상승을 제외하고는 관리기준 이하로 유지되고 있다(Table 4a). 온도 및 습도의 경우 입자와 동일한 지점에서 모니터링 되고 있으며 관리기준 내에서 안정적으로 운영이 되고 있다(Table 4b,c). supply plenum에서 C/R으로 공급되는 풍속은 0.4 m/s를 기준으로 $\pm 20\%$ 이내(0.32-0.48 m/s)에서 관리되며(Table 4d), 풍속유지를 위해 200 mm 및 300 mm 웨이퍼 제조 라인인 각각 axial fan 및 FFU(Fan Filter Unit) type 이 적용되고 있다. 기류는 top down 방식의 층류가 원칙이며, 청정영역이 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동되도록 Bay 및 S/A 바닥 패널 개구율을 조정하는 방법 등으로 관리되고 있다. 한편 외기와 C/R과의 압력 차이 즉 차압(Differential pressure)은 외기 대비 C/R내를 +1.0-2.5 mmH₂O(관리기준: 대기압 + 0.5 \uparrow mmH₂O)만큼 양압으로 유지함으로써 외부 오염이 C/R 내로 유입되지 않도록 철저히 관리되고 있다(Table 4e). 산 및 알칼리는 포토 및 메탈과 같은 특정 공정에 대해서 관리되어지는 오염으로 return 및 supply plenum에 이들 오염을 제거할 수 있는 Chemical filter(C/F)가 적용되어 있다. 각 물질 별 농도는 실시간으로 모니터링되며, 모두 관리기준 이하로 유지되고 있다(Table 4f,g). C/F 는 제거효율 80% 이하(효율평가: 2회/년) 또는 2년 주기로 교체 및 관리하고 있으며, 설비 유지 보수 작업 등 이들 물질의 비산에 의한 농도 상승을 사전에 방지하기 위해 이동용 국소배기 시스템이 사용되고 있다.

오존은 OAHU 시스템 마지막 단계에서 O₃제어용 C/F에 의해 1차 제거된 후 C/R 내로 유입되며,

diffusion 공정 area의 경우 return 및 supply plenum에 설치된 O₃제어용 C/F에 의해 2차 제거함으로써 공정에 영향이 없는 수준으로 유지 및 관리되고 있다(Table 4h). 특히 연중 하절기에 오존농도가 150-200 ppb 수준까지 상승하기 때문에 상반기에 C/F 효율에 대한 사전점검 및 교체를 진행하고 있다.

진동은 공조기나 건물자체 진동 등으로부터 격리시켜 진동에 민감한 공정(포토, 계측, 분석 등)의 경우 별도의 콘크리트 패드 접합식 타입의 독립기초, 즉 제진대를 설치하여 엄격히 관리하고 있다(Table 4i). 한편 반도체 C/R에서의 정전기 제어는 모니터링 개념에 의한 관리는 아니며, 라인 내 투입되는 모든 자재 별 개별관리(사전검사) 되고 있다. 정전기에 의한 제품 불량 발생되지 않도록 사전 예방이 중요하기 때문에, C/R 출입 작업자에서 발생하는 정전기는 라인 입실 시 착용하는 방진의류 및 제전화에 의하여 100% 제거한다. 설비의 경우, 설비 내에서 사용되는 재질 관리 및 각각의 설비에 대한 건물 접지를 실시하며, 건물의 경우 라인 내에서 사용되는 바닥 패널 및 Tile 등은 전도성 재질로 되어 있으며, 습도 제어(45 \pm 5%)에 의해서도 관리하고 있다. 또한, 라인 내에 투입 적용되는 모든 품목에 대해서는 사전 검사를 실시한 후 반입하며, 정전기에 의한 문제 발생이 예상되는 구역 및 설비 그리고 시설에 국부적인 이온화 장치(Ionizer)를 설치함으로써 정전기를 관리하고 있다.

IV. 고 찰

1. 환기

반도체 산업은 그 특성상 신공정 및 신물질 도입이 필요불가결하기 때문에 제조공정에는 다양한 화학물질이 사용되고 있으며, 화학물질의 수는 점점 증가하고 복잡해지고 있는 추세이다(Levinshtein et al., 2001). 따라서 반도체 제조 과정 특히 생산 및 부대 설비(1차 스크러버 등)의 유지보수 작업 시에 원료물질 및 원료물질간의 화학반응에 의한 부산물의 노출 및 흡입에 의한 작업자 건강영향 여부에 대한 관심이 높은 상황이다. 대부분의 반도체 설비는 밀폐구조로 되어 있어 공정 중에 화학물질의 노출은 없으나, 설비 유지보수 작업 중에는 노출 가능성을 완전히

배제할 수 없기 때문에 국소배기시스템(외부식 및 이동식)을 적용하고 있으며, 본 시스템으로 제거되지 못한 오염에 대해서는 return 및 supply plenum에 설치된 ULPA 필터(입자 제어) 및 다양한 C/F(산, 암모니아, 유기물 제어)와 같은 제어시스템에 의해 제거되며, C/R 전체 공기량 대비 10-25%의 FA공급 및 시간당 60-80회의 공기순환에 의해 C/R 공기 내 입자 및 오염농도(F, Cl, Br, SO₄, NO₂, NH₄ 등)는 각각 Class 1-1,000 및 수 ppb 이하로 낮게 관리되고 있다 (Table 2,4). 또한 반도체 공정 별 부산물 연구에서도 SiO₂, TiO₂, WO₃등으로 추정되는 다양한 파우더 및 공기 중 입자가 부산물로 생성되지만, 반도체 C/R의 입자관리, 환기시스템 등에 의해 공기 중 노출농도는 0.02 µg/m³이하 수준으로 노출기준 대비 극히 낮은 것으로 보고되고 있다(Choi et al., 2013; 2015a; 2015b; 2015c).

도심 공기 중 입자 수 농도는 대략 1,000,000 particles /ft³(0.1 µm 입자 기준)이며, 일반적으로 사무실 공조에서는 환기횟수를 시간당 6-12회로 설계하고 있는 것과 비교할 경우, 반도체 제조 C/R은 웨이퍼 뿐만 아니라 작업자에게도 청정한 환경을 제공하고 있다고 판단된다.

2. 압력(차압)

반도체 제조 C/R(Plenum 포함)은 기압을 대기압 대비 0.5 mmH₂O 이상 높게 유지함으로써 외기로부터 입자를 포함한 오염원의 차단에 의해 청정도가 관리되고 있다. 기압은 공기의 밀도와 관련이 있는데 고도에 따라 공기의 밀도는 급격하게 감소하며, 그에 따라 기압도 함께 감소한다. 일반적으로 지표면 근처에서 고도가 증가할수록 기압은 매 100 m당 약 11.7mb(119.3 mmH₂O = 0.0115 atm)의 비율로 감소하여 고도 5 km 상승 시의 기압은 대기압 대비 약 1/2 감소하는 것으로 알려져 있다(Pidwirny, 2006). 반면 지표면을 기준으로 아래로 내려갈수록 기압은 증가하게 되는데, 반도체 C/R 환경에서의 기압(대기압 대비 + 1.0-2.5 mmH₂O)은 지표면 아래 0.84-2.10 m(대기압 대비 + 9.68x10⁻⁵ - 2.42x10⁻⁴ atm) 수준으로 건물의 지하 1층에서의 압력에 해당된다. 이와 같이 반도체 C/R 환경이 양압을 유지하고 있지만 대기압 대비 거의 차이가 없기 때문에 일반적인 건물 내

작업환경과 동일한 수준임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 200 mm 및 300 mm 반도체 웨이퍼 제조환경인 C/R의 구조, 공기조화, 오염제어시스템의 특성 및 오염 관리현황 확인을 통해, 반도체 제조 C/R을 이해하고 작업자 보건관점에서 고찰하였다. 반도체 작업환경은 다양한 제조공정에서 발생할 수 있는 제품 불량을 사전에 방지하고 작업자에게는 쾌적한 환경을 제공하기 위해 입자, 온도, 습도, 풍속, 기류, 차압, 산, 알칼리, 유기물, 진동, 정전기 등의 주요 오염인자를 ULPA 필터, C/F, FA 공급(10-25%), 환기(60-80 회/hr), 제진대 등의 제어시스템에 의해 엄격히 관리되고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 이상상황 발생 시 작업자가 입자, 산 및 유기물 등에 노출될 가능성을 완전히 배제할 수는 없기 때문에 사전 예방적 원칙에 기초하여 반도체 제조 C/R이 제품생산 뿐만 아니라 작업자에게도 친환경이 지속적으로 유지될 수 있도록 끊임없는 공정 및 작업환경 개선의 필요성이 있다. 본 연구는 반도체 산업에서의 작업자 건강장해와 작업환경과의 연관성 고찰 및 규명에 있어 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

References

- Choi KM, Kim TH, Kim KS, Kim SG. Hazard identification of powder generated from a chemical vapor deposition process in the semiconductor manufacturing industry. *J Occup Environ Hyg* 2013;10(1):D1-D5
- Choi KM, An HC, Kim KS. Identifying the hazard characteristics of powder by-products generated semiconductor fabrication processes. *J Occup Environ Hyg* 2015a;12(2):114-122
- Choi KM, Yeo JH, Jung MK, Kim KS, Cho SH. Size, shape, and crystal structure of silica particles generated as by-products in the semiconductor workplace. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2015b; 25(1):36-44
- Choi KM, Kim JH, Park JH, Kim KS, Bae GN. Exposure characteristics of nanoparticles as process by-products for the semiconductor manufacturing industry. *J Occup Environ Hyg* 2015c; DOI: 10.1080/15459624.2015.1009983
- Chung EK, Kim KB, Chung KJ, Lee IS, You KH et al.

- Occupational exposure of semiconductor workers to ELF magnetic fields. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2012;22;42-51
- International Organization for Standardization(ISO). ISO 14644-1, Cleanrooms and associated controlled environments-Part 1: classification of air cleanliness. 1999
- Kim EA, Lee HE, Ryu HW, Park SH, Kang SK. Case series of malignant lymphohematopoietic disorder in Korean semiconductor industry. *Saf Health Work* 2011;2: 122-34
- Lee HE, Kim EA, Park JS, Kang SK. Cancer mortality and incidence in Korean semiconductor workers. *Saf Health Work* 2011;2;135-47
- Levinshtein ME, Romyantsev SL, Shur MS.(ed.). Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. John Wiley & Sons Inc.; 2001
- Ohmi T. Ultra clean ULSI technology. Baihunkan. 1995
- Park DU, Byun HJ, Choi SJ, Jeong JY, Yoon CS et al. Review on potential risk factors in wafer fabrication process of semiconductor industry. *Korean J Occup Environ Med* 2011;23;333-342
- Park DU, Lee KM. Critical review of retrospective exposure assessment methods used to associate the reproductive and cancer risks of wafer fabrication workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2012; 22;9-19
- Park HH, Jang JK, Shin JA . Quantitative exposure assessment of various chemical substances in a wafer fabrication industry facility. *Saf Health Work* 2011;2:39-51
- Park SH, Shin JA, Park HH, Yi GY, Chung KJ et. al. Exposure to volatile organic compounds and possibility of exposure to by-product volatile organic compounds in photolithography processes in semiconductor manufacturing factories. *Saf Health Work* 2011;2:210-217
- Park SH, Shin JA, Park HD. Exposure possibility to By-products during the processes of semiconductor manufacture. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2012;22:52-59
- Park SH, Park HD, Shin IJ. Exposure characteristics for chemical substances and work environment management in the semiconductor assembly process. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2014;24:272-280
- Pidwirny M. Fundamental of physical geography, 2nd Edition. Date Viewed. 2006;19:2009
- Standard, US Federal. FED-STD-209E. Airborne particulate cleanliness classes in clean room and clean zones. 1992
- Whyte W. Cleanroom Technology - fundamentals of design, testing and operation. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons Inc.; 2001. Chapter 1:1-8
- Wilson L. International technology roadmap for semiconductors (ITRS). Semiconductor Industry Association, 2013