

# 마이크로 시스템 분자급 미세오염 제어

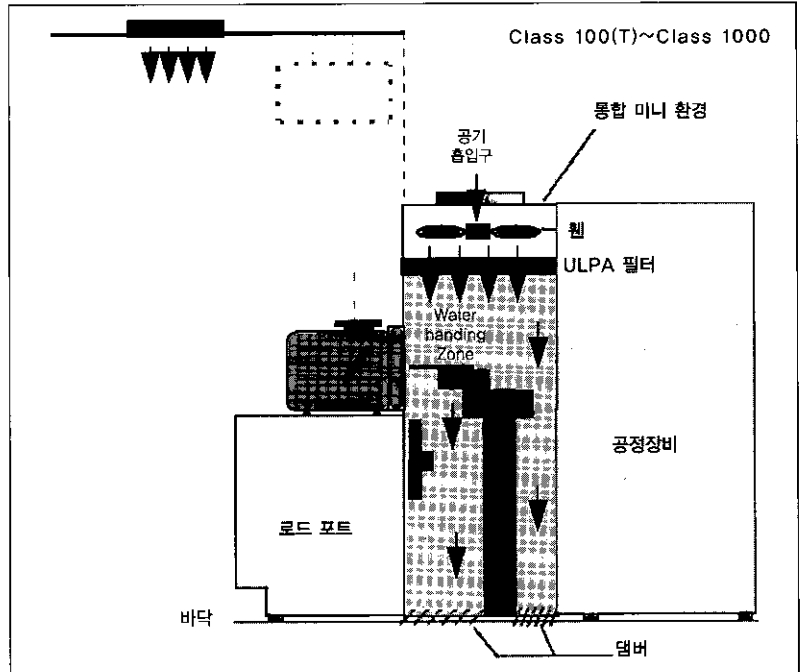
이 글에서는 GIGA급 반도체 제조공정 등과 같이 초소형, 고정밀도 기기 및 부품소재 공정시 발생하는 초미세 나노입자 및 가스상 오염에 대해 알아보고 그 제어방법을 소개한다. **황정호, 배귀남**

**최** 근 기계공학에서 지능형, 초소형, 인간친화형, 고순도, 고정밀도 기기 및 부품소재에 대한 관심이 높아짐에 따라 미세오염 제어기술은 산업 전반에 걸쳐 중요한 기술로 부각되고 있으며, 오염원에 대한 안전성 평가 그리고 정밀계측하는 모니터링 기술의 중요성이 증가되고 있다. 기술이 적용되는 예를 들면 반도체, 정보저장기기, 신소재 제조, 마이크로 머신, 인체 친화 환경 청정공정, 표면처리, 광학기기, 차세대 바이오 산업 등이 있다.

정보저장기기의 경우, 하드디스크드라이브(HDD), 광디스크드라이브(ODD)의 대용량, 소형화 추세이며, 이를 위해서는 안정성 및 내구성을 확보해야 한다. 이때 헤드 및 미디어의 나노스케일 정밀설계/가공 및 제어가 필요한데, 미세한 오염의 영향으로 드라이브의 제작 및 작동 환경에서 치명적인 에러가 발생하여 안정성과 내구성에 심각한 영

향을 미친다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 오염원의 물리적·화학적 특성을 규명하는 것과 동시에 영향을 최소화할 수 있도록 안정적인 시스템의 설계 기술이 요구된다. 즉 미세 오염원

의 직접적인 제어와 동시에 오염원으로부터 내구성을 가질 수 있도록 시스템 구조를 변경하는 기술이 필요한 것이다. 이와 같이 고속으로 회전하는 정밀기기 내 미세 오염을 최소화하기 위해서



통합 미니 환경 시스템

- 황정호 / 연세대학교 기계공학과, 교수 / e-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr
- 배귀남 / 한국과학기술연구원 지구환경연구센터, 선임연구원

는 마이크로 유동해석이 필수적이며, 그 결과가 궁극적으로는 헤드/슬라이더, 그리고 카트리지 설계 등에 고려되어야 한다. 마이크로 유동해석은 위에서 언급한 헤드/디스크 사이 미세간극을 형성하는 공기베어링(ABS) 유동뿐 아니라 잉크젯프린터의 분사노즐 유동, 그리고 생명공학분야에서 혁신적으로 개발중인 DNA 칩 내에서의 분자 유동 등 계속 그 영역이 확대되고 있다.

이와 같은 PC용 정보저장기기 뿐 아니라 지능형 총돌 회피시스템, 자동순항 시스템과 같은 안전을 위한 첨단기술이 적용되는 미래형 자동차에는 한정된 공간 내에 많은 전자정보기기들이 장착되어 있으므로 이들 장치의 오작동은 단순히 차량 성능에만 영향을 미치는 것이 아니라 인간의 생명을 빼앗아 갈 수 있는 중요한 문제이다. 기기의 기계적 오작동은 온도, 습도와 밀접한 관계가 있으며, 따라서 이들 전자제어장치의 센서부분을 오염시킬 수 있는 가스/입자상 물질의 규명 및 제어는 기기의 펌키징, 작동뿐 아니라 설계 단계에서부터 고려되어야 한다.

이와 같은 미세 오염 문제는 반도체 제조공정의 경우에 더욱 중요하다. 반도체 집적도의 발전은 약 2~3 년의 주기로 세대교체가 일어나고 있으며, 웨이퍼의 대구경화와 디바이스의 고집적화가 급속하게 진전되고 있기 때문이다. 초첨단 제품인 반도체의 기술은 곧 GIGA급 반도체인 1 G

DRAM 개발이 예상되며, 2010년에는 16 G까지 발전될 것으로 예상하고 있다. 그러나 GIGA급 시대로 돌입해야 하는 시점에서 웨이퍼에 대한 오염제어 범위가 새로이 개발되어 적용되는 생산 장비와 연계하여 점차 확대되고 미세화되고 있으며, 16 G DRAM 개발에서 제어되어야 할

도는 크기이다. 보통 입자상 물질의 최소크기는 약 2 nm 정도이며, 분자상 물질의 크기는 0.1~1 nm 정도이다. 따라서 초미세입자와 거대분자 클러스터는 크기가 거의 비슷하므로 보통 분자급 오염제어라 하면 경우에 따라 초미세입자의 제어까지 포함한다. 이러한 분자상 오염물질은

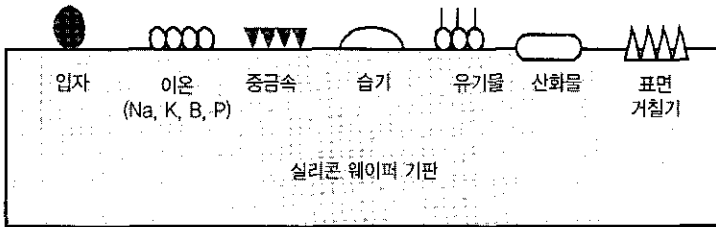
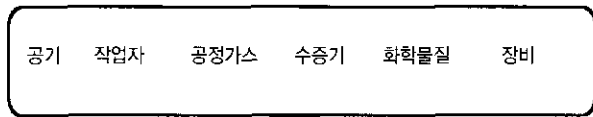
Year	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Feature Size(μm)	0.35	0.25	0.18	0.13	0.10	0.07
Memory (DRAM)	64M	256M	1G	4G	16G	64G
Die Size (mm <sup>2</sup> )	160	260	420	670	1070	1700

오염은 Feature Size의 1/10인 10 nano 크기의 초미세입자와 분자크기의 가스까지가 포함된다. 즉 반도체 제조는 그 집적도가 높아짐에 따라 회로선폭(Design Rule)의 간격이 좁아져 생산공정 라인에서 제어해야 할 오염물질의 크기도 점점 작아지고 있다. ULSI(Ultra-Large Scale Integration)의 제조공정에 있어서 웨이퍼에 어떠한 형태이든 간에 오염원이 부착한다면 여러 가지의 형태로 디바이스 불량이 발생하여 수율과 신뢰성이 저하된다.

최근에는 공기중의 원자, 분자, 이온 오염(AMC : Atomic Molecular Contamination) 수준이 반도체 FAB에서 점점 중요해지는 환경 요소로서 주목받고 있다. 이와 같은 가스나 분자상태의 오염물질을 입자상태의 오염물질과 구별할 수 있는 간단한 척

HEPA필터의 가장 작은 공극 구멍보다 10<sup>4</sup>배 정도 더 작다고 한다.

그 동안 반도체 제작설비에서의 공기오염물질을 제어하기 위한 많은 노력들은 주로 입자상 물질에만 초점을 맞추어 왔다. 입자상 물질에 의한 미세 오염은 주로 정전기력이나 반데르발스 인력에 의한 결함으로 웨이퍼에 부착하여 물리적인 결함을 야기시킨다. 그 예로 디바이스의 불량률 패턴의 이상과 절연막의 핀홀에 기인한 배선의 단선, 배선간의 단락 등으로 나타나 불량률의 상황 및 발생 기구가 직감적으로 알기 쉬운 경우가 많다. 웨이퍼에 부착된 입자상 물질의 제거 방법은 초음파 세정과 SCI 세정 등이 사용되며, 평가 방법으로는 기체, 액체 표면 측정기 및 XMA 원소감정 등을 적용한다. 이와 같은 물리적인 불



분자급 오염 물질 오염원

량과는 달리 화학반응에 의한 디바이스 불량은 그 실체가 입자 형태도 있지만, 원자, 분자 또는 이온과 같이 전자현미경으로도 관찰할 수 없는 미시적 존재가 주원인이다. 화학적 오염은 오염원 자체의 크기가 매우 작기 때문에 외관 검사 자체는 어렵고 웨이퍼 상의 정착성 또한 화학흡착, 이온, 산화 및 환원 반응과 같은 화학반응으로 이루어지기 때문에 세정에도 어려움이 있다. 화학적 오염에 의한 불량은 웨이퍼 표면 전반에 나타나며, 전류 leak나 정착 불량 등의 형태로 나타난다.

### 분자급 미세오염 물질의 종류 및 영향

분자 오염물질(AMC)은 크게 산(Acids), 염기(Bases), 유기화합물(Condensables), 첨가물(Dopants) 등으로 나뉘며, 각각 0.01~10, 1~100, 10~1000,

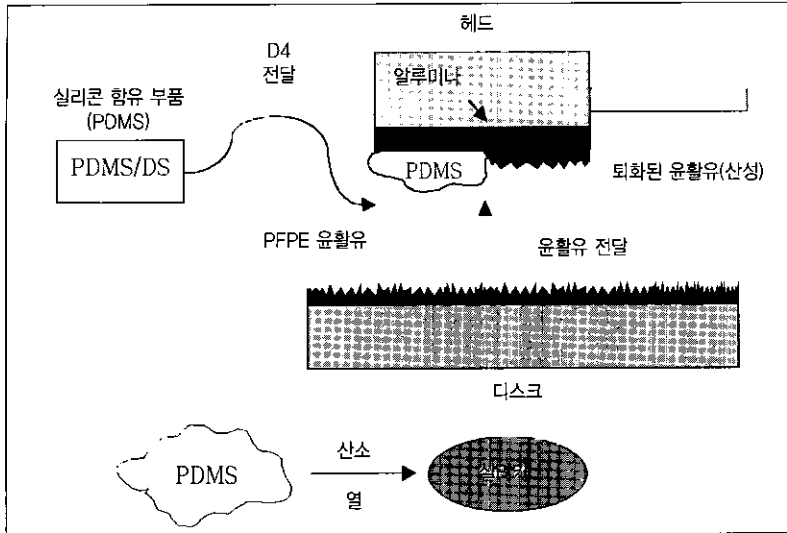
~1의 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 가진다. 산으로는 HF,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , HCl,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , HBr,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  등이 있으며, 염기로는  $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_4\text{H}_9\text{NO}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}$ ,  $\text{CH}_3\text{N}$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$  등이 있다. 가스 유기물은 대부분 응축으로 인해 미세 입자로 변환될 가능성이 많으므로 Condensables라고 하는데 그 종류는 다양하며, 외기종의 휘발성 유기화합물(VOC) 및 대기 중에서 발생하는 BHT( $\text{C}_{15}\text{H}_{24}\text{O}$ ), TBP( $\text{C}_{12}\text{H}_6\text{C}_{14}\text{O}_2\text{S}$ ), DBP( $\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_4$ ) 등이 있다. 첨가제는 붕소, 인, 비소 등이 있다.

산 중에서 HCl,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  등이 주로 외부공기로부터 유입되는 반면 HF는 식각(Etch)공정시 또는 습식세정 장비에서 새나와 HEPA 필터 여재와 반응하여  $\text{BF}_3$ 를 발생시킨다.  $\text{SO}_x$ 와  $\text{NO}_x$ 의 경우는 웨이

퍼 상에 나타나는 물반점에 의한 세정불량과 HTO 공정에서 마우스 결합, 사진(Photo) 공정시 수율을 저하시키는 문제와 Photo 장비인 스텝퍼의 렌즈 표면에 암모늄염을 증착시켜 조도 저하 등의 문제를 야기한다.  $\text{HPO}_4$ 의 경우는 웨이퍼 상의 패드의 변색으로 인한 접촉불량을 야기하여 전체적인 수율을 저하시키는 원인으로 작용한다.

알칼리계 오염가스는 암모니아, 아민 등인데, 암모니아는 외부공기, 작업자, 습식세정 공정이 원인이며, 노광과정(Exposure)에서 렌즈나 거울을 흐리게 하며, 패턴불량을 초래한다. 아민은 주로 사람으로부터 발생하며, 화학적 저항을 교란시키기도 한다. 아민과 암모니아는 Deep UV 공정에서 발생하는 산을 중화시키며, 이때 생성된 초미세 중성염은 웨이퍼 표면 상에 침착되어 패턴불량, 접촉저항 증대, 전기적 특성 변화 등의 영향을 미친다. 이러한 중성염의 일부는 ULPA 필터에 의해 포집되는데, 이때 비휘발성 강산가스에 의해 반응하여, 분자량이 작은 휘발성 산성가스는 재방출되어, 클린룸 내의 여러 금속 소재의 부식과 ULPA 필터의 식각현상을 심화시키며, 공정의 화학약품들과 반응하는 문제를 야기할 수 있다.

유기물들의 종류는 다양하며, 순간적으로 웨이퍼 표면에 흡착하여 1 분자층 이하의 막을 형성하거나 반응을 일으켜 웨이퍼 표면의 전기적 특성을 잃게 만들며,



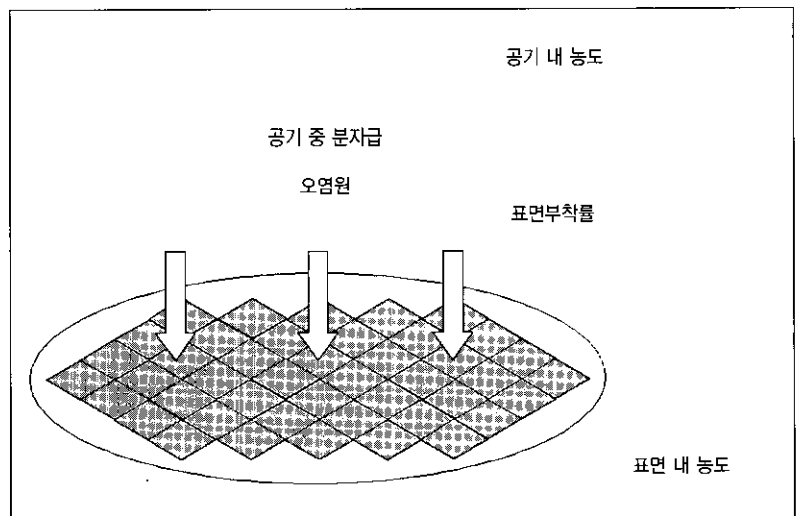
부품에서 방출된 가스오염원이 마이크로 시스템에 부착되는 경로

웨이퍼에 접합불량, 산화막절연 내압열화 등 여러 결함을 일으키므로 반드시 제어되어야 한다. 이러한 유기물의 흡착 메커니즘에 대해서는 아직도 제대로 설명을 못하고 있는 실정이다. 유기물들은 외기, 클린룸 구성 물질, 공기 조화 물질, 생산장비, 운송/저장 물질, 공정 케미컬 등에서 유입되는데 미량의 VOC 물질도 생산물에 심각한 영향을 미치는 것으로 조사되고 있다. 식각공정 전의 Si 기판표면에 유기물 오염이 존재할 경우 균일한 식각의 진행이 불가능하며, 결함발생의 원인이 된다. 또한 유기물오염은 Si 기판 표면에 흡착되어 박막계면에 잔류 또는 박막 형성 시에 막중에 혼입되어 디바이스 특성을 저하시킨다. 각종 HC 유기 화합물은 디바이스 불량률의 원인으로 작용하는데 노광과정에서 렌즈와 거울을 흐리게 하고 산화공정에서

이산화규소의 유전성을 저하시킨다. 일반적으로, 실리콘 웨이퍼 표면의 유기물은 웨이퍼 표면에 화학 흡착에 의한 성분, 물리 흡착에 의한 저 분자량 화합물 성분과 고분자 화합물 성분 등 세 종류로 분류된다. 여기서 화학 흡착된 성분은 표면과의 결합이 매우

강하기 때문에 유기용제 세정액 또는 진공흡입 등의 간단한 방법으로는 제거되지 않으며, 고온까지 가열하여 제거해야 한다. 한편, 물리 흡착에 의한 저 분자량 유기물은 표면과 강하게 결합되어 있지 않으므로, 주변 분위기 중의 성분들과 평형상태로 될 가능성이 있다. 따라서 분위기 중의 유기물 농도가 낮지 않으면 자연적으로 표면에서 이탈, 제거되며, 특히 초고진공 중에 넣을 경우 곧바로 표면에서 이탈될 수 있다. 또한 고분자량 부착물은 특히 강한 결합이 아니지만 분자량이 크기 때문에 증기압이 매우 낮아서 간단히 표면으로부터 제거되지 않는다. 만일 이것을 실리콘 웨이퍼 표면에 잔류한 상태로 가열 처리하게 되면, 탄화물이 생성되어 궁극적으로 SiC로 되어 제거 불가능한 위험성까지도 있다.

첨가물 오염은 에어필터 등 자



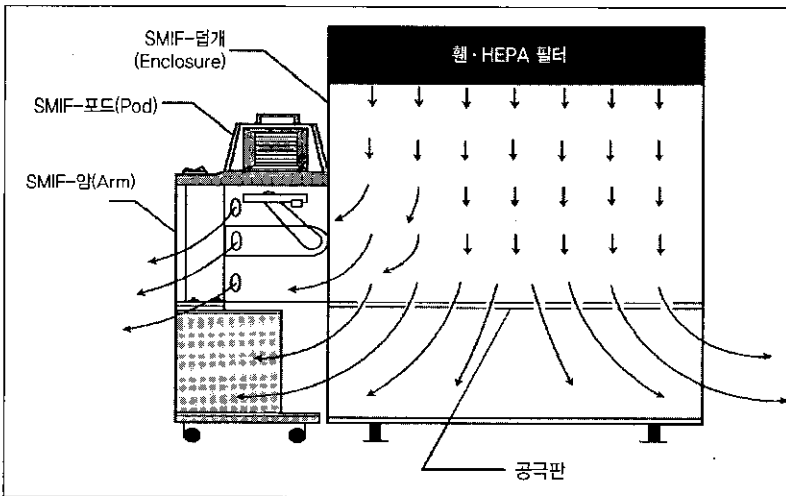
AMC의 웨이퍼 부착 해석 모델링

재에서 초래되는데 주로 보론가스( $\text{BF}_3$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) 및 인(P) 등이다. 인은 주로 소화재 물질에서 발생하며, 보론과 함께 IC 디바이스의 전기성능을 교란시키고 게이트 전극의 임계(threshold) 전압을 변화시킨다. 보론은 수증기, HF와 같은 부식성 가스가 유리섬유 필터를 통과할 때 부산물로 생성되며, 여기에 포함된 미량의 보론이 ULPA 필터를 통과할

중요하다. 즉 Fe, Ni, Cu 등의 중금속이 Si 기판에 확산되면 캐리어 수명저하, 접합손실(Leak) 전류증가를 야기시킨다. 또한 이들 중금속 오염은 산화유기적층결함을 발생시켜 접합손실 전류증가 등의 원인이 된다. 이러한 금속오염은 공정장치의 마모재, 반응생성물 등에서 오염되므로 이것 역시 제어되어야 한다. 이외에도 오존의 경우는 HSG 공정에서 엠보

성을 일으킨다. 반응성 가스는 실란더, 배관재와 반응하여 부식을 초래하며, 그 결과 금속 오염물이 생성된다. 이 결과 정밀제어를 요구하는 유량계, 압력계 등의 기능저하를 유발시킨다.

이러한 영향은 회로선폭이 작아질 때 더 커진다. 예를 들어, AMC는  $0.8\ \mu\text{m}$  선폭에서 정상적인  $0.5\ \mu\text{m}$  SRAM의 산출을 불가능하게 하거나 감소시킬 수 있다. 밀집한 장치들은 이런 형태의 오염물질에서 훨씬 민감하게 나타난다. 따라서 이러한 문제점들과 디자인을 해결해야 한다. 256M/1G DRAM의 경우 디바이스 설계규제가 점점 강화되고 칩의 크기가 작아짐에 따라 커패시터의 크기 축소가 관건이 되어 HSG 공정을 개발하였으나, 이는 자연산화막에 의한 품질변화가 커 이에 대한 문제를 안고 있었다. 클린룸 내부에서의 오염의 양상은 많은 경우 공정과 관련된 것이 주된 것 이어서 그 반응 메커니즘의 규명도 어렵고 공정과의 상관성을 분석하여야 한다는 난제가 있다.



SMIF 적용 Fan Filter Unit

때 걸러지지 않은 채 클린룸 환경으로 유입되기도 한다. 클린룸의 공기 중에 HF가 존재하면 에어 필터의  $\text{B}_2\text{O}_3$  성분과 반응하여 보론 가스가 방출되며, 또한 클린룸의 공기중에 수분이 증가되면 수분과  $\text{B}_2\text{O}_3$  성분이 반응하여 보론 가스가 방출된다.

지금까지 설명한 산, 염기, 유기물, 첨가제 외에 중금속 오염도

심 커패시터의 성장에 장애를 초래하는 등의 영향을 끼친다. 또한 반응성 가스 내 포함되어 있는 산소와 수증기 역시 클린룸 공정에 부작용을 일으킨다. 이들은 공정 가스 내 불순물로 존재하거나 고온 표면 공정의 부산물이다. 수증기는 또한 반응로 벽이나 실리콘 웨이퍼의 표면산화제 생성, 디바이스 불량, 온도저감시의 핵생

### 분자급 미세오염 물질의 제어

이상과 같은 가스상 물질과 초미세나노입자의 영향은 향후 소자의 고집적화에 따라 더욱 심각해질 것이므로 이와 같은 오염물질들의 성상을 자동 연속적, 현장, 실시간으로 측정평가할 수 있는 기술개발과 유해가스를 경제

적, 효율적으로 제어할 수 있는 기술개발이 매우 절실히 요구되고 있는 실정이다. 단순한 배기로는 클린룸 환경제어가 충분하지 않기 때문에 HVAC 시스템의 일부로서 공기의 화학적 여과가 AMC 제어에 대한 선택의 해결책이 되었다. 화학적 FAB 공기 여과의 추가적인 잇점은 더욱 건강하고 안전한 작업 환경, 냄새에 의한 불평의 빈도 감소, 화학적 누설의 완화, 그리고 결과적으로 휴지 시간의 감소이다. 일반적인 실내공기 오염에 더 해서, FAB은 변하기 쉬운 화학약품들이 광범위한 분포를 보인다. 계속적으로 증가하는 화학적 처리의 복잡함과 줄어드는 제한범위에 의해 장치들이 더욱 더 AMC에 민감해지게 되고, 그래서 FAB 공기에 대한 화학적 순수성에 대한 특별한 주의가 요구되고 있다.

먼저 각 공정 영역별로 공기조화 시스템이 구축되어야 하며, 순환공기를 정기적으로 모니터링해야 한다. 또한 공정시 발생하는(outgassing) 가스오염이 적은 물질을 선정해야 하는데 최근에는 화학필터가 여과효과가 좋다고 알려져 있다. 현재의 기술로 외기중의 산성 및 알칼리성 분자, 유기물은 활성탄 및 화학흡착제

필터에 의해 약 90% 이상 제거되며, 클린룸 및 공정에서 발생하는 유기물은 섬유상 활성탄 화학필터로서 1.0~3.0 ppb까지 제거된다. 보론, 인 등의 첨가제와 중금속 분자 역시 고효율 청정필터로서 제거가 가능하다고 알려져 있다.

화학필터 외의 가스오염제어 기술로는 UV/광전자 촉매법에 의한 청정화장치가 있는데 국소 청정화 공간에서 초미세 입자와 가스상 오염물을 동시에 제어할 수 있는 효과적인 장치로서 효과적인 것으로 보고되고 있다. UV 광전자/촉매 장치 내에 웨이퍼를 저장할 경우, 장치 내부의 처리공간에서 순차적으로 가스오염 물질이 제거되어 증기압 차에 의하여 웨이퍼에 부착, 잔존하는 오염물의 기화를 일으키게 하여, 기관 부착 오염물이 기존의 UV/O<sub>3</sub> 세정처리의 경우와 비교해도 상당히 낮은 값을 나타낼 정도로 부착 오염물의 제거에도 효과적이다. 이상과 같이, UV 광전자/광촉매 시스템은 클린룸 내의 가스상 오염물질을 효과적으로 제거시킬 수 있을 뿐만 아니라, 웨이퍼 등의 기관의 표면오염 방지 효과가 매우 높은 것을 알 수 있다. 따라서 UV/광전자 촉매법 시스템은

초미세입자 또는 극미량의 가스상 오염물질의 부착이 문제시되는 반도체 프로세스에서 효과적으로 적용될 수 있다. 이밖에도 UV/광전자 촉매법장치는 항균, 탈취 및 NO<sub>x</sub> 등의 저감 성능을 가진다고 보고되고 있다. 광촉매 반응의 기본은 자외선 하에서 나타제형 티타늄 표면에서 발생하는 OH 라디칼의 생성인데, 이 OH 라디칼이 강력한 산화작용을 가지므로 대장균 및 살모넬라균, 황색포도상구균으로 대표되는 세균을 살균할 수 있다. 대장균에 대한 광촉매 효과의 실험에서 UV 조사 30 분까지 80%, 그리고 조사 1 시간 후에는 90%까지 대장균이 감소되는 것을 보여주고 있다. 그리고 OH 라디칼의 강력한 산화작용에 의하여 유기계의 악취들도 CO<sub>2</sub>로 변환, 분해시키는 실내공기정화에 대한 연구 결과도 있으며, 자외선이 조사될 때 광촉매 작용에 의하여 NO는 NO<sub>2</sub>로 산화되어 결국 NO<sub>3</sub>로 되며, 생성된 NO<sub>3</sub>는 주위 환경조건에서 수분과 반응하여 초산 미세입자로 되어 집진되거나, 옥외로 배출되어 비 등에 의하여 제거되게 된다.

## 기 · 계 · 용 · 어 · 해 · 설

### ▶ 마이크로 액체층(Liquid Micro-layer)

핵비등의 기포성장과정에서 기포면이 고체벽면과 접하는 접점 근처에 형성되는 매우 얇은 액체층으로, 액막의 두께는 분자크기 정도까지 작아질 수 있기 때문에 상경계면과 고체면 사이에 작용하는 van der Waals 힘이 추가적으로 고려되어야 한다. 핵비등에서 마이크로 액체층에서 열전달량은 기포 성장에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.