



이 글에서는 반도체 산업에서 기계공학의 중요성과 반도체 공정 기술의 변화와 함께 요구되는 입자제어 기술의 현황에 대해 소개하고자 한다.

반도체 산업과 기계공학

우선 기계공학 전공자를 대상으로 하는 기계저널에 기고할 수 있는 기회가 생긴 것을 기쁘게 생각하고, 이런 기회에 반도체와 기계공학의 관계에 대해 개인적인 경험을 바탕으로 평소에 하고 싶었던 말로 시작하고 싶다. 본인도 기계공학을 전공했고, 현재는 반도체와 관련된 분야에서 근무하는 경력을 가진 입장에서 이 지면을 통해 새로울 수 있는 정보가 전달되었으면 한다.

대부분의 기계공학 전공자들이 반도체 산업은 기계공학과 직접적인 관련성이 적다고 인식하고 있고 실제로도 반도체 회사에서는 다른 전공에 비해 기계공학을 전공한 인력이 상대적으로 적다. 여기에는 여러 가지 이유가 있겠지만 가장 큰 원인은 현장으로부터의 정보가 제대로 전달될 수 있는 통로가 부족한 것이 아닐까 생각한다. 공정 기술의 개발과 설비 운영과 관리, 개선 등에 우수한 기계공학 전공자들이 많이 필요함에도 불구하고, 부족한 정보의 전달로 인해 충분한 자질을 갖춘 인재들이 반도체 회사에 지원하지 못하고 있는 것이 안타까운 현실이다.

반도체는 기본적으로 전자의 이동과 제어를 통한 정보의 처리와 저장 관련 기술이 핵심이며, 반도체 소자(device) 자체에 대한 연구 측면에서는 주로 전자공학과 물리, 재료공학 등의 배경기술이 중요하다. 그

결과 잘 알려진 바와 같이 반도체 소자의 개발과 설계에 관한 영역에서는 해당 학문의 배경을 가진 인력들이 다수를 차지하고 있다. 그러나 반도체 산업은 이런 반도체 소자의 개발 및 설계가 중요한 한축을 차지하는 동시에, 그 설계를 실제로 구현할 수 있는 공정을 개발하는 연구와 또 다시 그것을 수익성 있는 양산이 가능하게 하는 제조 기술 역시 매우 중요하다. 흔히 언급되는 표현으로 반도체 산업은 장치산업이라는 말이 있다. 이것은 실제적인 반도체 칩(chip)의 생산과 제조는 각종 대규모 장비 설치를 동반한다는 것을 일컫는 표현으로, 반도체 제조공정에서는 수많은 고가의 설비들과 부대시설, 원료로 사용되는 가스와 케미컬의 공급계통과 클린룸(clean room) 등과 환경적인 요소들이 종합적으로 이용되고 있다. 모두가 필수적으로 열/유체를 활용하고 기계 장비를 사용해야 하는 환경이므로 이 분야에서는 기계공학을 전공한 인재들의 역할이 매우 중요하다.

반도체 산업과 입자공학

반도체 산업과 입자 크기

흔히 알려진 바와 같이 다른 어떤 산업보다 입자의 크기와 농도에 민감하고 나노미터 크기의 영역에서 입자를 제어하는 기술을 요구하는 분야가 반도체 제조 산업이라고 할 수 있다. 반도체 산업에서는 소자의

표 1 연도별 주요 반도체 제품의 최소 배선평과 제어해야 할 입자 크기의 변화(단위: nm)
(ITRS- International Technology Roadmap for Semiconductors 2000/2005/2009/2011)

	2002	2005	2009	2010	2011	2012	2013	2015	2020
플래시 1/2 피치	-	-	38	32	28	25	23	18	10
디램 1/2 피치	115	80	52	45	40	36	32	25	14.2
MPU M1 1/2 피치	130	90	54	45	38	32	27	21	11.9
중요(critical)입자크기	65	40	25 (2009)	22.5 (2009)	25	22.5	20	15.9	8.9

작동전압과 전류를 감소시키고 용량을 증가하기 위해 트랜지스터(transistor)나 캐패시터(capacitor), 회로 배선 등의 패턴(pattern) 크기를 지속적으로 줄여가는(shrink) 방향으로 기술적인 발전이 이루어진다. 이것은 동시에 주어진 실리콘 웨이퍼(wafer)에 더 많은 칩을 생산할 수 있는 결과를 가져오므로 크기의 감소는 필수적이다. 문제는 이러한 반도체 소자 크기의 감소가 제조공정에서 제어해야 할 입자의 크기 감소를 동반한다는 사실이다.

세계 주요 선진 반도체 업체들이 연합하여 반도체 소자에 대한 최신 기술기준을 제시하는 ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)는 표 1과 같은 반도체 기술기준의 변천을 보여주고 있다.

지금으로부터 10년 전에는 100나노미터 크기의 최소 배선 폭(feature size)를 가지는 반도체 제품들이 제조되었고, 당시에는 그 배선 크기의 절반 정도되는 65나노미터 입자들이 생산하는 소자에 불량을 유발할 수 있는 관리 기준으로 제시가 되었다. 2012년 현재 주력으로 생산되는 반도체 제품에 대한 디자인 룰(design rule)은 메모리의 경우 디램(DRAM)은 30나노미터, 낸드플래시(NAND Flash)의 경우 20나노미터 수준이며, 흔히 스마트폰에 사용되는 AP(Application Processor)와 같은 MPU(Micro Processing Unit) 제품도 30나노미터 초반의 배선 크기를 가진다. 이론적으로는 배선간격의 1/2 정도의 입자도 불량을 유발할 수

있다는 것을 의미하며 이와 같이 반도체 제품의 주요 배선 크기가 감소되는 현상은 일정 기간 동안은 지속될 것이다. 2020년이 되면 반도체 소자에서의 핵심 배선 크기는 10나노미터 수준이 되며 제어해야 할 입자의 크기는 10나노미터 이하로 감소할 것으로 예상하고 있다.

반도체 소자 및 제어해야 할 입자 크기 감소는 반도체 제조공정에서 다음과 같은 세 가지 측면에서의 큰 도전을 던지고 있다.

첫째, 일반적인 입자의 성질과 마찬가지로 반도체 제조공정에서의 입자도 다양한 크기 분포(size distribution)를 가지고 있으며, 평균적인 크기가 감소함에 따라 그 개수 혹은 입자농도는 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 특별히 반도체 제조공정에서 많이 경험하게 되는 화학적인 반응은 새로운 입자의 발생(generation)을 유발하므로 분자 수준의 크기부터 시작하는 입자들이 높은 농도로 존재할 수 있는 환경이 많다는 것을 의미한다. 이는 반도체 제조에서 불량을 일으키는 입자의 절대적인 수는 입자 크기의 감소와 함께 향후 지속적으로 증가할 수밖에 없다는 뜻이며, 이에 대한 대책의 마련이 더욱 시급해지게 된다.

둘째, 입자 크기의 감소는 전통적으로 입자에 의한 불량을 제어하는 대표적인 도구인 필터(filter) 성능의 한계를 가져오게 되며, 만약 제어해야 할 입자의 크기가 더욱 감소하여 분자 크기로 접근한다면 입자는 기체 분자의 브라운 랜덤 운동(Brownian Random



Motion)에 의한 확산(diffusion) 작용의 영향이 커지게 되어 공정 중에 반도체 웨이퍼 표면에 부착되는 확률이 급증하게 되는 특징을 가지게 된다.

셋째, 크기의 감소에 따라 입자의 농도가 급증하며, 반도체 제조공정 중 웨이퍼를 오염시킬 가능성은 더욱 커지는 동시에 일단 웨이퍼 표면에 한번 부착된 입자는 강한 부착 현상이 발생하여 제거하기가 매우 어렵게 된다. 크기의 감소에 따라 입자와 웨이퍼 표면 사이에서의 반데르발스 힘과 표면장력 등에 의한 부착력은 증가하지만, 동시에 유체의 경계층(boundary layer)이 형성되는 수준 이하의 크기로 입자가 존재하게 되면서 유체를 이용한 입자 제거 효율이 감소하는 결과를 가져온다. 이런 문제점은 잘 알려져 있으며 해결을 위해 반도체 제조공정에서는 매우 많은 습식세정(wet clean) 공정이 도입되어 있다. 또한 효과적으로 웨이퍼 표면의 입자를 제거하기 위해 메가소닉(Megasonic)을 이용한 캐비테이션 효과나 마이크로 액적(droplet)이나 에어로솔(aerosol) 등을 이용한 다양한 제거 기술들이 사용되고 있다. 그러나 입자의 크기가 작아지면서 발생하는 제거효율의 급격한 감소현상은 정도의 차이만 존재할 뿐 그 경향은 동일하며, 동시에 웨이퍼 표면의 입자를 제거하기 위해 가해지는 에너지나 충격량은 반도체 소자의 미세 패턴에 손상(damage)을 유발하게 되므로 입자 제거 효율과 패턴 보호 두 가지 상반되는 성질 가운데서 절충점을 찾아야 되는 한계를 가지게 된다.

요약하자면 반도체 산업에서는 소자의 패턴 크기를 점점 더 미세하게 구현하고자 하는 요구에 따른 기술의 발전 방향을 가지고 있고, 입자제어 측면에서는 불량률 유발하는 입자의 크기가 동시에 감소하는 위기를 맞고 있는 것이다. 입자 크기의 감소는 결과적으로 불량률 유발하는 입자의 개수가 급증하며 웨이퍼 표면의 입자 오염발생 확률이 커지는 동시에 기존의 입자 제거기술의 효율은 더욱 감소하게 되는 총체적인

난국을 의미한다. 실제로 반도체 제조회사들의 수율은 패턴의 미세화에 따라 일반적으로 감소하는 것으로 알려져 있으며, 이것은 입자제어 난이도 상승에 따른 영향이 반영되고 있음을 반증하고 있는 것이다.

반도체 공정과 입자제어

일반적으로 반도체 제조공정에서의 입자제어 기술에 대한 인식은 주로 클린룸 시설과 방진복과 방진 마스크 등의 착용, FFU(Fan Filter Unit) 유동제어 등과 연관된 기술, 그리고 웨이퍼 표면에 존재하는 입자를 제거하는 습식세정 공정 기술 등에 한정되어 왔다. 그러나 이미 반도체 제조공정에서는 효과적인 입자제어를 위해 제조 팹(FAB)의 클린 클래스(clean class) 수준을 더 높이거나, 더 미세하고 효율적인 필터를 많이 사용하는 정도의 기술 이상의 것들을 요구하고 있다.

현재 반도체 산업에서 주로 사용되는 웨이퍼 크기는 지름이 200mm(8인치)와 300mm(12인치)이며, 시장 점유율에서 선두권에 있는 주요 제조업체에서는 300mm 크기의 웨이퍼가 주력으로 생산되고 있다. 200mm에서 300mm 웨이퍼 생산 체제로 공정이 전환되면서 입자제어 측면에서 발생한 큰 변화 중 하나는 FOUP(Front Opening Unified Pod)이라는 개념의 도입이었다. 그림으로 간단히 설명하자면 그림 1과 같이 기존까지는 반도체 제조 FAB에서 웨이퍼는 클린룸 상태에 노출되는 공정들이 많았고 그렇기 때문에 클린룸의 청정도 수준이 매우 엄격하게 관리되어 왔다. 전자동(full automation) 제조 방식에 의한 비율이 높아진 300mm 웨이퍼 생산이 시작되면서 기존과는 달리 웨이퍼는 외부 클린룸 환경과는 차단된 FOUP이라는 캐리어(carrier)에 의해 밀폐된 상태로 이동이 되고 실제 공정이 이루어지는 설비 내부에서만 FOUP이 열려 웨이퍼가 공정 챔버(chamber)로 이동하여 공정을 진행하게 되었다. 그림 2가 FOUP이다.



그림 1 클린룸 환경에 노출된 웨이퍼
(Texas Instruments 사 제공사진)

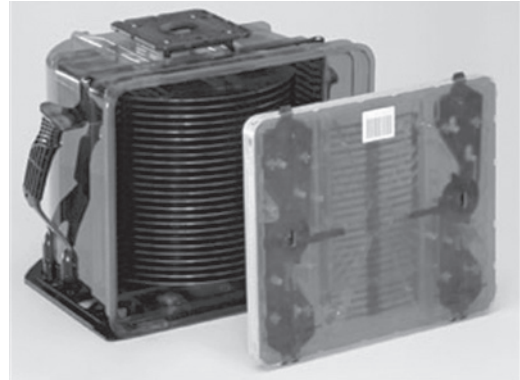


그림 2 FOUP(Front Opening Unified Pod)

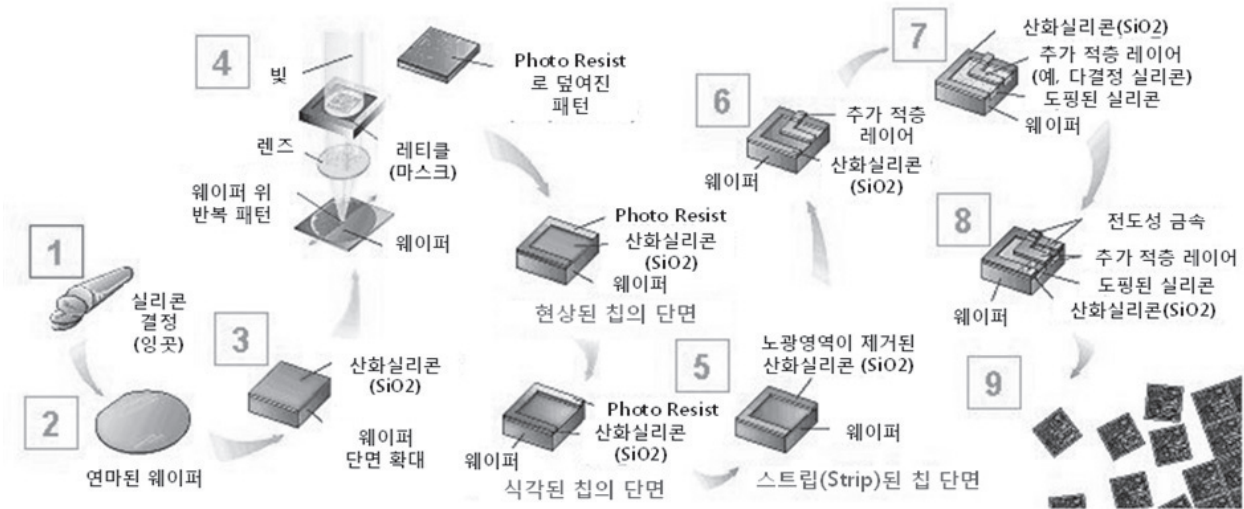


그림 3 반도체 제조공정(SEMATECH: <http://www.sematech.org/corporate/news/mfgproc/mfgproc.htm>)

FOUP의 도입은 미니 환경(mini environment)라고 불리는 국부적이고 독립적인 고청정도의 환경을 형성 하였고 반도체 생산 FAB 자체는 기존의 클래스1 수준의 고청정도의 클린룸 대신 클래스 1,000 정도의 일반 작업환경의 청정도만 유지해도 대기(airborne) 입자에 의한 불량의 위험이 문제되지 않는 시대가 되었다.

이러한 변화와 클린룸 환경과 관련된 기술적인 발전으로 인해 현재 반도체 제조공정에서의 입자발생 문제는 클린룸 환경 자체에 기인하는 비중은 크게 감소하게 되었고, 오히려 최첨단의 신기술이 적용되며

지속적으로 변화하는 제조 공정 자체와 생산 설비로 인한 문제가 추가 되는 시대를 지나고 있다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 입자가 웨이퍼 표면에 발생한 이후 제거하는 기술은 점점 한계에 이르게 되므로 공정과 설비에서 근원적으로 발생을 억제하고 이동을 제어하는 기술의 필요성이 부각되고 있다.

그림 3은 일반적인 반도체 제조공정을 도식화한 그림이다.

간단하게 설명하자면 단결정 실리콘 잉곳(ingot)을 절단하여 만든 원형의 실리콘 웨이퍼를 이용하여 표

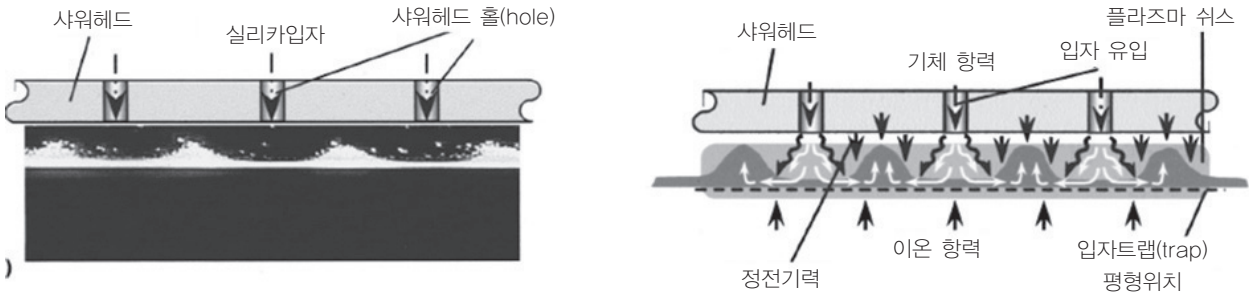


그림 4 플라즈마를 이용한 CVD 공정에서 Showerhead 주변의 입자 거동과 작용력 균형 (Journal of Applied Physics, Volume 92, Number 9, 2002)

면에 포토 리소그래피(Photo Lithography) 공정을 통해 패턴을 그린 다음 이후 건식식각(dry etch) 공정을 통해 패턴을 구현한다. 이후 CVD(Chemical Vapor Deposition)나 PVD(Physical Vapor Deposition) 공정 등을 통해 절연막이나 도전막 등을 형성하며, 적층된 박막들의 평탄화를 위해 CMP(Chemical Mechanical Planarization) 공정을 사용하기도 한다. 확산 공정을 이용해 박막을 산화(oxidation)시키거나 이온 주입(ion implantation) 공정으로 도핑(doping)하여 전기적 특성을 변화시킨다. PR(Photo Resist)이나 오염물질의 제거를 위해 습식세정 공정이 반복적으로 적용된다. 반도체 제조공정은 지속적으로 첨단 기술과 새로운 물질들의 사용을 요구하고 있고, 그 결과로 기존과는 다른 공정측면에서의 변화들이 발생하고 있다. 특징적으로 많은 반도체 제조 공정은 매우 낮은 압력, 보통 진공(vacuum)으로 불리는 상태에서 진행되고 있다. 이러한 진공상태에의 입자는 대기압 상태에서의 입자의 거동과는 다른 성질을 나타내는데, 희박한 기체 분자농도에 의한 유체 저항의 감소를 유발된다. 결과적으로 진공에서의 입자는 대기압에 비해 이동속도가 증가하게 되며, 압력이 감소할수록 입자는 유체의 유선을 따라가지 않게 된다. 진공의 환경을 형성하고 유지하기 위해서 사용되는 고성능 TMP(Turbo Molecular Pump)등의 고속회전 운동은 블레이드

(blade)에 충돌하게 되는 입자들이 매우 큰 속도와 운동에너지를 가지게 만들며, 이로 인한 웨이퍼 표면 패턴을 심각하게 손상시키게 되는 현상도 보고되고 있다.

또 하나의 중요한 변화의 흐름은 플라즈마(plasma)를 이용하는 공정의 증가에 따른 입자제어 기술의 난이도 증가이다. 반도체 제조공정은 주로 화학적인 반응과 물리적인 운동량 전달을 동반하고 있으며, 이를 위한 에너지의 공급을 필요로 한다. 가장 쉽게 사용할 수 있는 에너지는 열(heat)이 될 수 있으며, 많은 반도체 공정이 수백도 이상의 고온에서 진행되어왔다. 그러나 반도체 기술의 발전과 함께 저온 상태의 제조공정이 지속적으로 요구되고 왔고, 미세한 패턴 구현을 위해 기존의 고온 공정들이 플라즈마를 이용한 새로운 저온 공정들로 대체되고 있다. 플라즈마 공정은 기본적으로 진공 환경에서 이루어지며, 높은 밀도의 전자와 이온, 래디컬(Radical) 등 존재로 인해 일반적인 현실에서 경험하기 어려운 특이한 현상들이 많이 발생하며, 입자 측면에서도 발생과 이동 등의 거동이 흥미로운 양상을 나타내게 된다. 플라즈마 공정 환경에서 존재하는 입자는 전자나 이온의 충돌에 의해 매우 높은 수준의 표면 전하를 가지게 되며, 공정 챔버 내에서 급격한 전위차를 나타내는 벽(wall) 주위의 쉬스(Sheath) 영역에서는 다른 중력이나 관성력과 같은 작

용력보다 훨씬 큰 전기적인 힘의 지배를 받는다. 그림 4는 플라즈마를 사용하는 CVD 공정 중에 반응 가스가 나오는 샤워헤드(Showerhead) 주변의 쉬스 영역에 입자들이 부유 혹은 트랩(trap)되어 있는 사진과 그에 해당하는 여러 가지 힘들의 균형 상태를 보여주고 있다. 유체에 의한 저항력(drag)과 중력이 작용함에도 불구하고 이온항력(ion drag force)과 정전기적(electrostatic) 힘이 플라즈마 환경에서는 지배적으로 작용하기 때문에 표면과 일정거리가 떨어진 위치에 입자들이 안정적으로 부유하고 있음을 볼 수 있다. 만약 플라즈마를 형성하게 되는 전압이나 전력의 공급이 차단되게 되면 쉬스 주변에 부유하던 입자들은 즉시 정전기적인 힘이 사라지면서 중력에 의해 하부에 있는 웨이퍼 표면으로 낙하하며, 이로 인한 심각한 소자의 불량을 유발하게 되므로 이러한 현상을 제어할 수 있는 공정 기술의 개발이 점점 중요해지게 된다.

맺음말

반도체 산업의 발전과 함께 변화하는 제조공정 기술과 그에 따른 입자제어의 중요성과 개념의 변화에 대해 간략하게 소개하였다. 반도체 산업은 끊임없이 개발되는 수많은 최첨단 기술이 어느 다른 산업보다도 더 빠르게 적용되는 분야로 다양한 전공을 배경으로 가진 인재들이 자신의 역량을 발휘할 수 있는 장이며, 그러한 측면에서 반도체 산업에서의 기계공학 전공자 필요성은 매우 크다고 할 수 있다. 특히 반도체 제조공정에서의 입자로 인한 불량 문제는 점점 심각성이 커질 것이며 이를 극복하기 위해 입자제어 기술에 대한 더 많은 연구와 개발이 필요하다. 부족한 이런 글을 통해서라도 기계공학도들이 반도체 산업에 대한 정보들을 얻게 되어 반도체 관련 산업으로 더 많이 합류하게 되고, 그 곳에서 자신의 역량을 발휘하게 되길 바란다.



기계용어해설

진동전단기(Vibroshear)

폭이 좁은 절단날을 고속으로 진동시켜 판금의 직선 절단, 원형 절단, 자유 절단 또는 성형가동을 하는 판금가공용 동력 전단기의 일종.

슬랫 엘리베이터(Vertical Articulated Platform Conveyor)

4줄의 체인에 연결한 슬랫을 랫을 운반할 때는 수평으로, 귀환할 때는 수직으로 하여 회송하는 엘리베이팅 컨베이어.

수직형 보일러(Vertical Boiler)

등근 보일러를 수직으로 세운 것과 같은 모양이며, 일시적인 동력 보일러 또는 공사용 이동 보일러로 쓰기에 적합한 보일러.

비커즈 경도(Lickers Hardness)

꼭지각 136°의 다이아몬드 제4각뿔 압자를 써서 시험편에 피라미드형의 압입자국을 내고 그 대각선의 길이를 측정하여 환산표에서 경도를 구하는 것.

빅툴릭형 관이음(Victaulic Joint)

접속하는 관의 양쪽 끝에 특수한 모양의 개스킷을 끼우고, 그 위로 하우징을 덮어 씌워 볼트 및 너트로 체결하는 관이음.

빈센트 프릭션 프레스(Vincent Friction Press)

전동용 마찰판이 원뿔형이고, 램이 밑에서 위로 향하여 움직이며, 프레임에 작업압력이 작용하지 않는 프레스.