

차세대 반도체 표면 클리닝 기술들의 특성 및 전망

(주)아이엠티 레이저엔지니어링그룹
이종명, 조성호

ABSTRACT

A development of new surface cleaning technologies such as laser and aerosol in parallel with the improvement of conventional wet methods becomes more essential in semiconductor industry due the confrontation of new challenges such as significant device shrink, environmental foraluminum do not work for copper as a new interconnection material, and more effective cleaning tools are required with decreasing the feature size less than $0.13 \mu\text{m}$ as well as increasing the wafer size from 200 mm to 300 mm. In this article, various cleaning techniques including laser cleaning are compared methodologically in order to understand their unique characteristics such as advantages and disadvantages according to the current cleaning issues. In particular, the current state of art of laser technique for semiconductors and prospects as a dry cleaning method are described.

1. 서 론

최근 VLSI 제조 공정에 있어서 웨이퍼 클리닝 공정의 중요성이 부각되고 있다. 이는 웨이퍼 표면에 존재하는 금속, 입자 등과 같은 오염물질이 디바이스의 성능 및 수율(yield)에 지대한 영향을 미치기 때문이다. 일반적인 반도체 제조 공정에서 클리닝 공정은 미세 패턴을 형성하기 위한 광리소그라피, 에칭, 증착 등과 같은 공정 전후에서 반복적으로 실시되며, 전체 공정의 약 30-40%를 차지하고 있으며, 최근 회로선폭(feature size)의 감소 추세에 따라 클리닝 스텝수가 크게 증가하고 있다.^{1,2)}

반도체 클리닝 공정은 크게 화학 용매와 초순수(deionized water)를 주로 사용하는 습식 클리닝 방법과 플라즈마, 고압 에어로졸(aerosol) 및 레이저를

사용하는 건식 클리닝 방법으로 나눌 수 있다. 1970년에 개발된 습식 클리닝 방법은 반도체 디바이스 제조 공장에서 지금까지 널리 사용되고 있으나, 다량의 유독성 화학 약품과 물의 사용에 따른 환경 문제 및 높은 유지비용, 거대한 장비 사이즈에 의한 전용 면적(footprint)의 증가 및 장비 클러스터링(clustering)의 어려움, 열악한 작업 환경, 구리 및 저유전막(low-k dielectrics) 등과 같은 신소재에 대한 부적합성 등과 같은 많은 단점들이 노출되고 있다. 이와 같은 기존의 습식 클리닝 방법의 단점을 근본적으로 극복하고자 건식 클리닝 방법에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서 반도체 디바이스 제조 공정의 변천에 따른 웨이퍼 클리닝 공정의 중요성 및 이슈들을 알아보고, 현재 반도체 디바이스 제조 업체에서 사용하고 있는 클리닝 기술과 차세대 클리닝 기술들을 소개하고 각각의 방법들에 대해 비교 고찰을 해보겠다. 특히 현재 많은 연구가 이루어지고 있는 레이저 클리닝 기술에 대한 최근 동향, 문제점 및 전망에 대해서 논의해 보겠다.

2. 웨이퍼 클리닝 이슈

최근 회로선폭의 미세화, 구리 및 저유전막 등의 신소재 채용, 패턴의 큰 가로세로비(aspect ratio), 웨이퍼의 대구경화 등과 같은 반도체 제조 공정의 변천에 따라 클리닝 공정의 중요성이 크게 부각되고 있으며, 이에 대응한 클리닝 스텝수의 증가, 첨단 클리닝 기술 개발, 통합 클리닝 솔루션 등과 같은 다양한 기술적 요구에 직면해 있는 게 현실이다.

2.1. 디바이스의 고집적화(Device shrink)

최근 양산에 들어간 512 MDRAM 및 Pentium IV 와 같은 고집적 반도체는 회로선폭의 감소로 가능하게 되었다. 즉 과거 0.18 μm 에서 0.13 μm 로의 최

소 회로선폭 감소는 같은 크기의 디바이스에서 집적도를 크게 향상시킬 수 있게 한 것이다. 그러나 회로선폭의 감소는 반도체 제조 공정 중 허용 가능한 오염 입자들의 크기 및 잔존량을 크게 감소 시켜야 한다. Table 1은 ITRS Roadmap에서 제시한 반도체 회로선폭의 변화에 따른 오염입자들의 허용치 변화를 보여준다. 표에서 보여지는 바와 같이 회로선폭이 감소함에 따라 허용 가능한 입자의 크기가 감소함을 알 수 있다. 그러나 웨이퍼 표면 위 입자의 접촉강도(adhesion force)는 입자 크기가 감소함에 따라 크게 증가한다(Fig. 1 참조).³⁾ 결과적으로 회로선폭의 감소에 따라 보다 작은 입자들의 제거가 필수적이며, 또한 이와 같은 미세 입자들의 제거는 더욱 어렵다는 사실을 알 수 있다.

2.2. 신소재의 등장(Copper & low k materials)

최근 반도체 배선재료로 구리가 기존의 알루미늄을 대체하고 있으며, 기존의 절연재료인 실리콘 산화막(SiO₂)은 저유전물질(low-k dielectric material)로 대체되고 있는 실정이다. 구리는 배선 속도를 향상시키는 반면 부식(corrosion)에 상당히 민감해 강한 화학액을 사용하는 기존의 습식 세정

Table 1. Allowable particle size with feature size (2000 ITRS roadmap)

	1999	2002	2005	2008
Feature Size(nm)	180	130	100	70
Particle size(nm) @front	90	65	50	35
Particle (ea/cm ²) @front	0.064	0.068	0.052	0.052
Particle size(nm) @back	667	500	400	300
Particle (ea/cm ²) @back	0.63	0.55	0.48	0.42
Critical surface metal(atoms/cm ²)	$\leq 9 \times 10^9$	$\leq 4.4 \times 10^9$	$\leq 2.5 \times 10^9$	$\leq 2.1 \times 10^9$
Surface organics (C atoms/cm ²)	7.3×10^{13}	5.3×10^{13}	1.28×10^{13}	9.02×10^{13}
Surface roughness (nm)	0.15	0.12	0.1	0.08

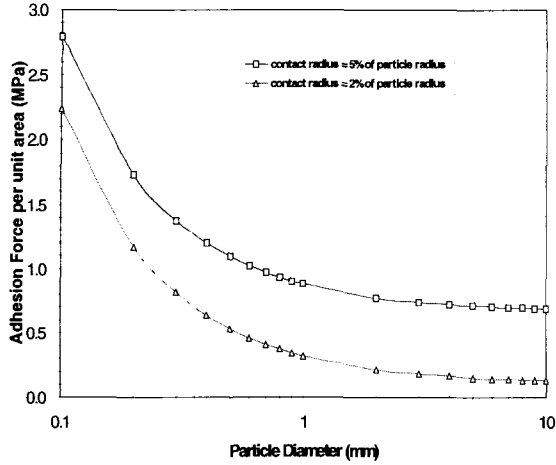


Fig. 1. Adhesion force change as a function of the particle size: Van der Waals force of copper particle on silicon wafer

방법으로는 표면 클리닝이 어려워 새로운 화학액의 개발이 시급한 실정이다. 또한 저유전막의 경우도 막질의 다공성 및 연성 특성으로 인해 기존 화학액에 쉽게 손상을 입을 수 있다는 단점으로 인해 우수한 절연 특성에도 불구하고 그 사용이 제한되고 있는 실정이며, 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

2.3. 웨이퍼의 대구경화(300mm wafer processing)

최근 생산성의 획기적 향상을 위해 200 mm 웨이퍼 프로세싱에서 300 mm 웨이퍼 프로세싱으로 점차적으로 전환되고 있다. 웨이퍼의 대구경화에 따라 약 2.5배의 생산성 향상을 꾀할 수 있으나 이에 따른 화학 용매 및 물의 사용은 그 만큼 크게 증가하게 된다. 이는 환경적 문제가 크게 이슈가 되는 최근 시점에서 기존 습식 클리닝 방법의 큰 문제점으로 작용하고 있다. 또한 다량의 웨이퍼를 한번에 처리하는 배치방식의 기존 클리닝 방법은 매엽식 처리(single-wafer processing)를 기본으로 공정을 클러스터링(clustering) 하고자 하는 최근 추세에 적용하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

3. 현대 클리닝 기술

웨이퍼 클리닝 공정은 모든 반도체 제조 공정의 전후에 반드시 수행되어 진다. Fig. 2는 반도체 제조 공정에서 클리닝의 위치를 보여주고 있다. 반도체 제조 공정 중 웨이퍼 표면을 오염시키는 불순물의 종류로는 크게 입자(particle), 유기오염물(organic contaminant), 금속오염물(metal impurity), 자연산화막(native oxide)으로 나눌 수 있다. 이러한 오염물질은 디바이스의 성능 및 제조 수율을 크게 떨어뜨려, 최대한 표면으로부터 제거함을 클리닝의 목적으로 한다.

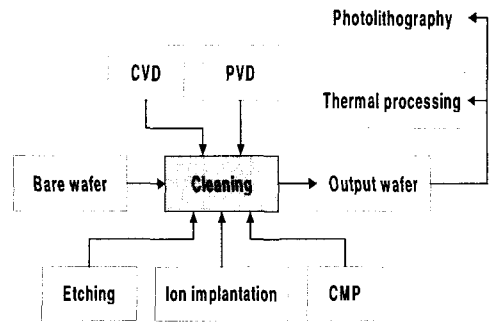


Fig. 2. Cleaning process in semiconductor fabrication

3.1. RCA 클리닝

현재 반도체 제조 공장에서 널리 사용하고 있는 습식 클리닝은 1970년 Kern이 발명한 RCA 클리닝(미국 RCA사에서 개발되어 그 이름을 따서 명명) 방법을 기반으로 하고 있다. RCA 클리닝은 크게 APM(Ammonium Peroxide Mixture), HPM(Hydrochloric Peroxide Mixture), SPM(Sulfuric Peroxide Mixture), DHF(Dilute Hydrofluoric Acid)의 조합을 기본으로 한다.⁴⁾ APM은 입자 제거 성능이 뛰어나며, HPM은 금속 오염물의 제거에 용이하며, SPM은 유기 오염물, 그리고 DHF는 자연 산화막 제거에 뛰어난 성능을 발휘한다. 대부분의 반도체 제조 회사들은

이들 4가지 혼합액의 독자적인 함량 및 처리 순서를 가지고 세정 공정을 수행하고 있다. Table 2는 RCA 클리닝을 위한 화학액의 표준 조성, 제거 오염 물질 및 공정상의 부작용 등을 보여주고 있다.

RAC 클리닝을 이용한 전통적 습식 세정 방법의 장점은 배치타입 처리에 의한 대량 처리가 가능해 높은 처리능력(throughput이 약 300 wph)을 가진다는 점이며, 단점은 다량의 유독성 화학액 및 물의 사용, 큰 장비 사이즈(footprint)에 따른 환경적, 비용적, 공간적 문제를 들 수 있다.

Table 2. RCA cleaning process and side effects

Wet chemicals	Typical Composition	Effective removal contaminants	Side effects
APM: Ammonium Peroxide Mixture	$NH_4OH + H_2O_2 + H_2O = 1:1:5$	Particles, Organic residus	Al & Cu attack, native oxide, surface roughness
HPM: Hydrochloric Peroxide Mixture	$HCl + H_2O_2 + H_2O = 1:1:5$	Metallic impurities (Al, Fe, Mg)	Native oxide
SPM: Sulfuric Peroxide Mixture	$H_2SO_4 + H_2O_2 = 4:1$	Gross organics (grease, Wax, PR)	Native oxide
DHF: Dilute Hydrofluoric Acid	$HF + H_2O$	Native oxide(SiO_2)	Reactive surface

3.2. 플라즈마 클리닝

현재 반도체 제조 공정에서 플라즈마 클리닝이 사용되는 대표적인 공정은 감광막 제거 공정(PR stripping or ashing)이다. 반도체 패턴을 형성하기 위한 광리소그라피 공정에 사용된 감광막(photoresist)은 에칭 혹은 이온주입 공정이 끝난 후 제거해야 하는데 이때 산소 플라즈마 클리닝 기술이 사용된다.⁵⁾ 유기물질로 이루어진 감광막은 산소 플라즈마에 의해 발생한 산소 라디칼(radical)과 반응하여 이산화탄소로 탄화(carbonizing)됨으로서 제거가 이루어지게 된다.

Fig. 3은 원격 플라즈마에 의한 웨이퍼 클리닝 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 기존의 감광막 제거는 황산을 이용한 습식 방법을 사용하였으나 지금은

플라즈마를 이용하여 인시츄(in-situ)로 진공 챔버 내에서 클리닝을 수행함으로써 공정시간의 단축 및 효과적인 다음 공정 처리가 가능하게 되었다. 플라즈마 클리닝 방법은 유기물질의 제거에 뛰어난 성능을 발휘하나, 무기입자 및 양면 클리닝이 불가능하고 웨이퍼 차징(charging)등의 문제점이 제기되고 있다.

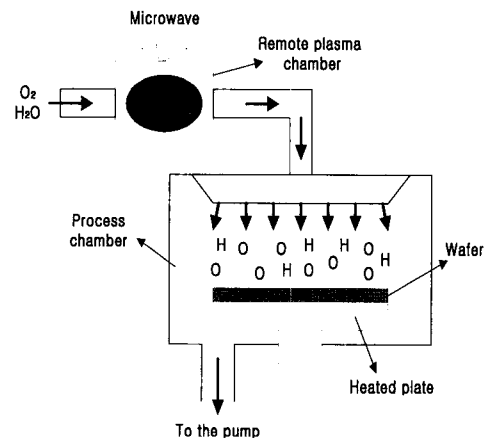


Fig.3. Schematic diagram of remote plasma ashing system

3.3. 스크러버 클리닝(Scrubber cleaning)

스크러버 클리닝 방법은 말 그대로 부드러운 재질의 물질(보통 PVA 사용)로 웨이퍼를 문질러 표면의 오염 입자들을 제거하는 기계적 방법이다. 대표적인 응용 공정으로 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정 후 웨이퍼 표면에 강하게 붙어 있는 슬러리(slurry) 및 마모입자 등을 제거하는데 사용되어 진다. 스크러빙 방법의 장점은 기계적 접촉식 방법에 따른 강력한 입자 제거 성능을 들 수 있으나, 접촉식에 따른 표면 손상의 가능성이 높다는 단점이 있어 CMP 공정과 같은 평탄하고 단단한 막질 표면 위의 오염입자 제거에 한정적으로 사용되어 진다. Fig. 4는 Lam Research 사의 DSS(Double Sided Scrubber)시스템을 이용한 웨이퍼 클리닝 모습을 보여주고 있다.

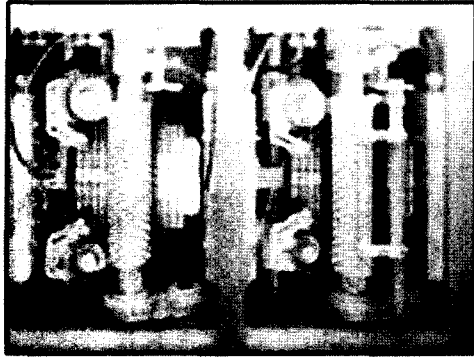


Fig.4. Schematic diagram of double sided scrubbing process

4. 차세대 클리닝 기술

최근 반도체 소재 및 제조 기술의 급속한 발전과 기존의 습식 세정 방법의 많은 문제점 등을 극복하고자 새로운 개념의 차세대 클리닝 기술에 대한 요구가 커지고 있다. 특히 클리닝 후 오랜 건조 시간, 금속 부식 문제, 엄청난 양의 물의 사용 및 폐수의 방출을 피할 수 없는 습식 클리닝 방법을 근본적으로 대체하고자 건식 클리닝 기술 개발에 최근 반도체 장비 업체들은 많은 심혈을 기울이고 있다. 현재 많은 연구 노력을 기울이고 있는 차세대 반도체 클리닝 기술을 간략히 소개해 보기로 하겠다.

4.1. 매엽식 습식 클리닝(Single wafer wet cleaning)

웨이퍼의 집적도가 증가하고 대구경화됨에 따라 클리닝 공정의 제어(control)가 매우 중요한 문제로 부각되었고, 이에 부응해 기존의 배치방식(batch-type) 습식 클리닝 방법이 매엽식 클리닝 방식으로의 전환을 꾀하고 있다. 매엽 방식은 한번에 웨이퍼를 한 장씩 처리함으로써 목표 수율과 공정 재현성 확보를 위한 제어가 가능하며, 사용 화학액 및 물의 양을 크게 줄여 오폐수를 줄이고, 이의 재활용이 용이하다는 환경적 이점으로 최근 크게 부각되고 있는 클리닝 기술이다. Fig. 5 는 메가소닉바(megasonic bar)를 이용한 Vertec 사의 매엽식 습식 클리닝 시

스텝 및 원리를 보여주고 있다.⁶⁾

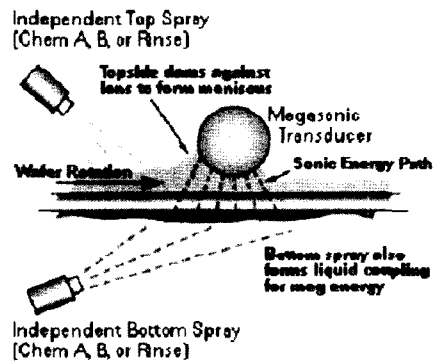
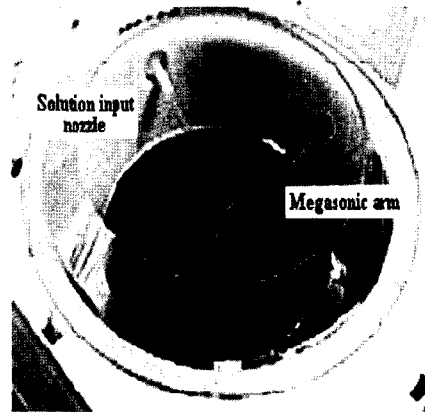


Fig.5. Single wafer wet cleaning system and its principle

기존의 배치방식과 비교해 낮은 처리속도(보통throughput이 60 wph 이하)가 느리다는 단점은 기술의 확산을 저해하는 요인으로 작용하고 있다.

4.2. 저온입자분사 클리닝(Cryokinetic cleaning)

현재 연구 개발되어 지고 있는 건식세정방법중에 하나가 저온입자 분사방법(cryokinetic cleaning)이다. 저온입자소스(cryokinetic source)로 대표적인 물질은 이산화탄소(CO₂)와 아르곤(Ar)이다. 저온 고압 하에서 액체 상태로 저장되어진 상기 가스를 특정 구조의 노즐을 통해 대기로 분사되면, 압력과 온도의 열

역학적 변화에 의해 드라이아이스(dry ice) 혹은 에어로졸(aerosol) 상태로 표면에 분사된다. 이때 열역학적 에너지와 입자 모멘텀(momentum) 에너지에 의해 표면에 붙어 있는 오염물질을 제거하게 된다.⁷⁾ Fig. 6은 저온입자 분사 방법의 기본 원리를 보여주고 있다. 노즐에서의 분사 압력을 조절함으로써 쉽게 클리닝 파워를 조절할 수 있다. 그러나 이산화탄소는 그 물질 자체의 고순도 문제 및 입자 크기의 제어 문제 등으로 인해 반도체 클리닝 목적으로는 사용에 제약을 받고 있으며, 아르곤 에어로졸 방법의 적용이 기대되나, 이 또한 기계적 입자 충돌에 의한 표면 손상(특히 pattern damage) 및 저온 열 충격(thermal shock)에 의한 웨이퍼 손상 가능성이 크다는 단점이 있다. 현재 미국의 FSI International 사에서 실용화를 위한 연구 및 장비 개발이 이루어지고 있다.

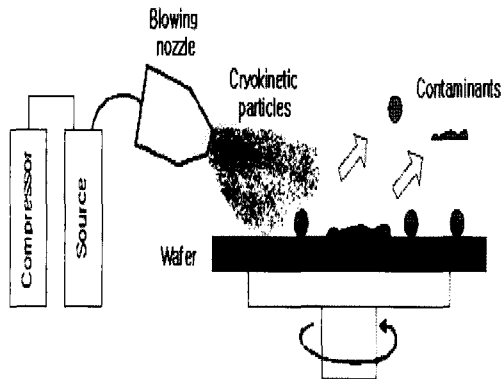


Fig.6. Schematic diagram of cryokinetic cleaning process

4.3. 레이저 클리닝(Laser cleaning)

반도체 표면 클리닝 위한 레이저 기술은 일반적으로 UV 레이저(특히 excimer laser)를 사용하여 적절한 빔 형태 제어 및 스캐닝(beam shaping & scanning) 장치를 사용하여 웨이퍼 표면에 레이저빔을 직접 조사함으로써 오염물질을 분해(dissociation) 혹은 탈착(detachment) 시키는 것을 말한다.^{8,9)} Fig. 7은 전형적인 UV 레이저 클리닝 시스템을 보여주고 있다. 레이저 클리닝 방법은 특히 유기 오염물질을 제거하는

데 탁월한 능력을 발휘하여 에칭 혹은 이온주입 공정 후의 감광막 및 감광막 잔유물(PR residue) 제거에 응용 가능한 공정으로 알려져 있다. 최근 이스라엘의 Oramir 사는 적절한 활성 가스와 엑시머 레이저빔을 이용해 플라즈마 아싱(ashing) 공정 후 남아 있는 감광막 잔유물을 성공적으로 제거하였다. Fig. 8은 플라즈마를 이용한 폴리 실리콘 에칭(poly-Si etching) 및 아싱 공정 후 남아 있던 잔유물을 엑시머 레이저로 클리닝한 모습을 보여준다.¹⁰⁾ 현재 미국의 Applied Materials 사는 Radiance Service 사가 가지고 있는 엑시머 레이저 클리닝 원천 기술을 독점 계약하고, 상기 Oramir 사를 인수하여 본격적인 상용 장비 개발에 노력을 기울이고 있다. 그러나 레이저 클리닝 방법은 작은 레이저 스폿 사이즈로 인한 느린 처리속도, 낮은 생산성, 마이크로 이하(submicron)의 미소 입자 제거의 어려움,⁹⁾ 고에너지밀도 레이저빔의 직접 조사에 의한 모재 손상 가능성, 고가인 엑시머 레이저 장비 등과 같은 문제점을 안고 있다. 한 예로, Fig. 9는 기존 UV 레이저빔을 이용한 미소 무기 입자의 제거 어려움을 보여주고 있다. 실리콘 모재의 손상 레이저 밀도가 0.3 J/cm² 인데, 이에 매우 근접한 0.28 J/cm² 에너지의 레이저빔 조사시에도 텅스텐 입자가 거의 제거가 되지 않음을 보여주고 있다. 이는 내열성 물질인 텅스텐의 열팽창계수가 매우 작아 레이저빔 흡수에 의한 열탄성 힘(thermo-elastic force)이 충분히 발생하지 않기 때문이다.¹¹⁾ 결과적으로 기존의 UV 레이저 클리닝 방법은 비열탄성 급속 입자 뿐 만이 아닌 열팽창계수가 매우 작은 실리카(silica), 알루미나(alumina)등과 같은 미소 세라믹 입자들의 제거가 쉽지 않아, 무기입자의 제거가 이슈가 되고 있는 반도체 공정에서는 적용이 어려운 실정이다.

이러한 단점들을 극복하기 위한 새로운 개념의 레이저 클리닝 기술이 최근 보고되고 있으며, 많은 연구와 노력이 진행 중에 있다.^{12,13)}

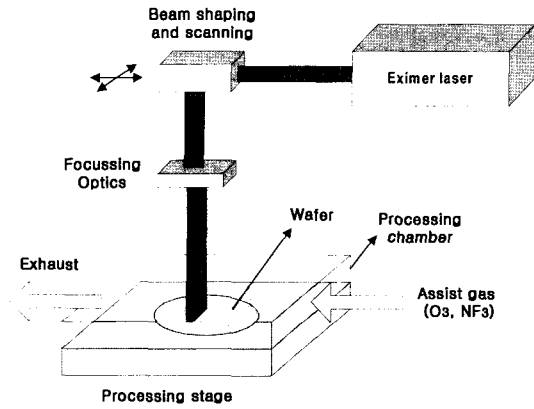


Fig.7. Schematic diagram of typical UV laser cleaning system

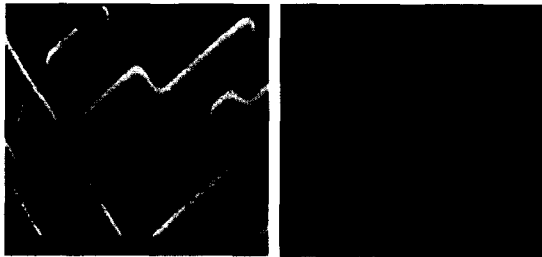


Fig.8. Patterned wafer surfaces after laser removal of PR residue

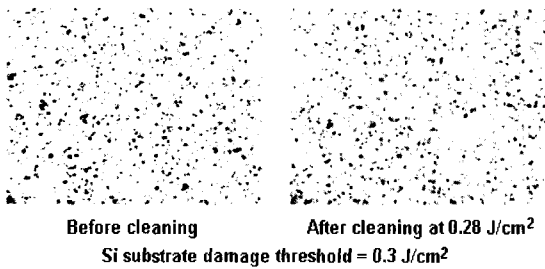


Fig.9. Si wafer surfaces before and after laser cleaning of tungsten particles

5. 결론

지금까지 반도체 제조 공정에 있어 클리닝 공정의 중요성 및 최근 문제가 되는 이슈들, 그리고 현재 사용되고 있는 클리닝 기술들과 차세대 클리닝 기술들에 대해 논해 보았다. 각각의 기술들은 나름대로의

장점과 단점들을 가지고 있으며, 웨이퍼의 형상, 노출 재료 및 제거 오염물질의 종류에 따라 적절한 클리닝 방법의 선택이 중요하다. 또한 향후 반도체 클리닝 기술은 기존의 습식 클리닝 대 건식 클리닝, 그리고 배치 방식 대 매엽 방식과의 치열한 경쟁이 예상된다. 특히 레이저 클리닝 기술은 광 에너지라는 청정 클리닝 방법 및 우수한 유기 오염물 제거 성능 등과 같은 장점을 가지고 있으나 낮은 처리속도 및 열악한 무기 오염물 제거 성능과 같은 단점들로 인해 실제 응용을 위해서는 보다 많은 연구와 노력이 필요한 실정이다. 또한 집적도의 증가에 따른 회로선 폭의 지속적 감소, 새로운 반도체 소재의 도입 및 웨이퍼의 대구경화 등과 같은 최근 추세에서 클리닝 공정의 위치는 향후 반도체 제조 공정에서 더욱 더 중요해지리라 사료되며, 이에 부응한 새로운 클리닝 기술 및 장비에 대한 연구 개발은 매우 중요한 과제라 하겠다.

참고 문헌

1. R. DeJule, "Trends in wafer cleaning", Semiconductor international, Technical article, Aug. 1998, <http://www.e-insite.net/semiconductor>
2. Aaron Hand, "Wafer cleaning confronts increasing demands", Semiconductor international, Technical article, Aug.2001, <http://www.e-insite.net/semiconductor>
3. J. M. Lee, K. G. Watkins, "Laser removal of oxides and particles from copper surfaces for microelectronic fabrication", Optics express, Vol. 7, No. 2, pp. 68-76, 2000
4. 박진구, "Wet station", 월간반도체, No. 149, pp. 2-12, July 2000
5. H. Xiao, Introduction to semiconductor

- manufacturing technology, pp. 255-257,
Prentice-Hall Inc., 2001
6. Anonymous, "Advanced new megasonics,
improved process uniformity, non-damaging",
<http://www.verteq.com/goldfinger/>
 7. J. F. Weygand, N. Narayanswami, D. J.
Syverson, "Cleaning silicon wafers with an
argon/nitrogen cryogenic aerosol process",
Technical report, FSI International Inc., Aug.
1997
 8. J. M. Lee, In-process and intelligent monitoring
systems for laser cleaning process, Ph.D. thesis,
Chap. 3, Univ. of Liverpool, UK, Sept. 1999
 9. J. M. Lee, C. Curran, K. G. Watkins, "Laser
removal of copper particles from silicon
wafers using UV, visible and IR
radiation", Applied physics A, Vol. 73,
No. 2, pp. 219-224, 2001
 10. M. Genut, Y. Uziel, O. Tehar-Zahav et al,
"Chemically assisted laser removal of
photoresist and particles from semiconductor
wafers", Project report, Oramir Semi. Equip.
Ltd., 1998
 11. J. M. Lee and K. G. Watkins, "Removal of
small particles on silicon wafer by
laser-induced airborne plasma shock wave",
Journal of applied physics, Vol. 89, No. 11, pp.
6496-6500, 2001
 12. J. M. Lee, K. G. Watkins, W. M. Steen,
"Angular laser cleaning for effective removal of
particles from a solid surface", Applied physics
A, Vol. 71, No. 6, pp. 671-674, 2000
 13. J. M. Lee, K. G. Watkins, W. M. Steen,
"Surface cleaning of silicon wafer by laser
sparking", Journal of laser applications, Vol. 13,
No. 4, pp. 154-158, 2001