

# 레이저 유기 충격파를 이용한 웨이퍼 표면 미소입자 제거

이종명, 조성호

## Removal of small particles from silicon wafers using laser-induced shock waves

J. M. Lee, S. H. Cho

(주)아이엠티/레이저응용그룹

### ABSTRACT

Basic principles and unique characteristics of laser-induced shock cleaning have been described compared to a conventional laser cleaning method and the removal of small tungsten particles from silicon wafer surfaces was attempted using both methods. It was found that the conventional laser cleaning was not feasible to remove the tungsten particles whereas a successful removal of the particles was carried out by the laser-induced shock waves. From the quantitative analysis using a surface scanner, the average removal efficiency of the particles was more than 98% where smaller particles were slightly more difficult to remove probably due to the increased adhesion force with a decrease of the particle size. It was also seen that the gap distance between the laser focus and the wafer surface is an important processing parameter since the removal efficiency is strongly dependent on the gap distance.

**Key words** : particle, laser cleaning, shock wave, silicon wafer, tungsten, adhesion force

### 1. 서론

LSI 제조 공정에 있어서 웨이퍼 클리닝

공정의 중요성이 부각되고 있다. 이는 웨이퍼 표면에 존재하는 금속, 입자, 유기체 등과 같은 오염물질이 디바이스의 성능 및 수율

(yield)에 지대한 영향을 미치기 때문이다. 일반적인 반도체 웨이퍼 클리닝 방법으로는 화학 용매와 초순수(deionized water)의 혼합액을 사용하는 RCA 습식 클리닝 방법이 사용되고 있다. 그러나 다량의 유독성 화학 약품과 물의 사용에 따른 환경적 문제 및 높은 유지비용, 거대한 장비 사이즈에 의한 점유면적(footprint)의 증가, 그리고 열악한 작업 환경 등과 같은 많은 문제점을 가지고 있다. 또한 최근 구리 및 저유전막(low-k dielectrics) 등과 같은 신소재의 등장, 회로 선폭의 지속적 감소에 의한 극 미소 입자 제거의 필요성, 웨이퍼 사이즈의 거대화(300 mm) 및 공정 클러스터링(process clustering)의 필요에 따른 매엽식 클리닝(single-wafer cleaning) 기술의 필요성이 크게 부각되고 있다.<sup>1,2)</sup> 이와 같은 기존 웨이퍼 세정 방법인 화학적 습식 클리닝 방법의 단점을 근본적으로 극복하고, 반도체 제조 공정의 유연성 및 재현성을 확보하고자 매엽식 건식 세정 방법에 대한 연구 개발이 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

광 에너지를 사용한 레이저 클리닝 방법은 어떠한 화학물질도 사용하지 않는 환경 친화적 클리닝 방법으로 최근 큰 각광을 받고 있는 청정 기술이다.<sup>3-5)</sup> 단색성, 직진성과 같은 레이저 빔이 가진 고유특성을 이용해 표면 위 오염물질을 선택적으로 제거할 수 있으며, 빔과 물질간의 상호작용이 매우 짧은 시간에 이루어져 매우 정밀한 세정을 수행할 수 있고, 공정 제어 및 자동화 또한 용이하다는 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 작은 레이저 스폿 사이즈에 의한 상대적으로 느린 클리닝 속도, 고밀도 레이저 빔의 직접 조사에 의한 취약한 모재 표면에의 손상 가능성, 그리고 고가의 클리닝 시스템 등과 같은 해결해야 할 문제들도 가지고 있다. 이러한 문

제점들을 해결하고자 다양한 레이저 클리닝 응용 기술들이 연구 개발되고 있다.<sup>5-7)</sup>

본 논문에서 레이저 유기 충격파 클리닝(laser-induced shock cleaning)이라는 새로운 클리닝 방법의 원리 및 클리닝 메커니즘을 소개하고, 실리콘 웨이퍼 위의 미소 텅스텐 입자 제거 실험을 통해 기존 레이저 클리닝과의 차이점을 설명하였다. 또한 웨이퍼 표면 스캐너를 이용하여 정량적인 입자 제거 성능 및 공정 파라미터의 영향을 고찰해 봄으로써 실제 웨이퍼 클리닝 목적으로의 적용 가능성에 대해 논의해 보겠다.

## 2. 레이저 유기 충격파 클리닝

레이저 유기 충격파 클리닝의 원리를 이해하기 위해서는 클리닝 대상이 되는 표면 위 미소 입자의 접촉에 대한 이해가 필수적이다. 고체 표면 위 입자의 접촉은 크게 3가지 힘, 즉 반데르발스 힘(Van der Waals force), 모세관 힘(capillary force), 정전기 힘(electrostatic force)에 의해 부착되어 있다. 보통 입자 크기가 50  $\mu\text{m}$  이하이고 건식 표면의 경우 지배적인 힘은 반데르발스 힘이며, 아래 식 (1)로 표현된다.<sup>8)</sup>

$$F_v = \frac{hr}{8\pi Z^2} + \frac{h\rho^2}{8\pi Z^3} \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 Lifshitz-Van der Waals 상수,  $r$ 은 입자 반경,  $\rho$ 는 입자 접촉 면적 반경,  $Z$ 는 모재 표면과 입자간 거리이다. 식 (1)을 이용하여 입자 크기에 따른 실리콘 표면 위 접촉힘(adhesion force)의 변화를 계산해보면 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 입자 크기가 작아 질수록 입자와 모재간의 접촉힘은 크게 증가하며, 이는 작은 입자일수

록 제거하기가 더욱 더 어렵다는 것을 알 수 있다. 크기가 1  $\mu\text{m}$  텅스텐 입자의 경우 단위 면적당 접촉힘은 대략  $4 \times 10^5 \text{ Pa} (= \text{N/m}^2)$  이상으로, 이는 입자에 작용하는 중력(gravitational force)의 약  $10^7$  배 이상이 되는 대단히 큰 힘이다. 결과적으로 이렇게 단단히 부착되어 있는 미소 입자의 제거를 위해서는 접촉힘 이상의 큰 물리적 힘이 입자에 가해져야 한다는 것을 알 수 있다.

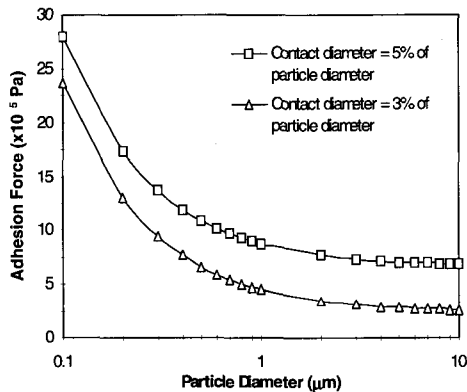


Fig. 1. Adhesion force (per unit area) change with the particle size (between a tungsten particle and a silicon substrate)

Fig. 2은 레이저 유기 충격파 클리닝의 원리를 도식화한 그림이다. 보통 매우 짧고 강력한 레이저 펄스를 클리닝 하고자 하는 모재 상부 공기 중에 집속 시키면, 초점 위치에서 공기중의 입자들(주로  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ )은 강력한 레이저 빔의 전자기장에 의해 파쇄(break down)가 일어나 이온화되며, 강력한 플라즈마를 발생한다('multi-photon ionization' 현상). 이 때 순간적인 플라즈마 팽창에 의해 충격파가 발생하며 사방으로 전파하게 된다. 만일 발생 플라즈마 유기 충격파 힘이 모재 위 오염 입자들의 접촉힘 보다 크면 오염물의 탈착(detachment)이 일어나는데, 이를 "레

이저 유기 충격파 클리닝"이라고 한다 (특허 기술).<sup>9,10)</sup> 레이저 유기 충격파의 힘은 초점에서의 레이저 파워 밀도에 의존하며, 보통  $10^{12} \text{ W/cm}^2$ 의 파워 밀도에서 수백 MPa의 힘이 발생하며, 전파함에 따라 그 힘은 감소하게 된다. 결과적으로 상기 레이저 충격파의 힘은 오염 입자들의 접촉힘 보다 대략 수백 배 이상 크며, 따라서 용이하게 미소 입자 제거를 수행할 수 있게 되는 것이다.

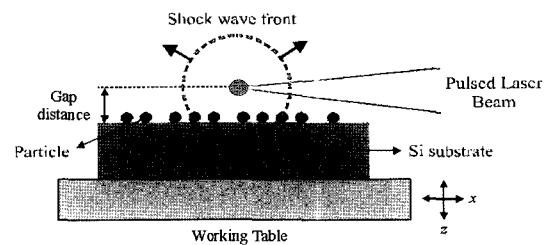


Fig. 2. A schematic illustration of laser-induced shock cleaning

### 3. 실험방법

Fig. 3은 기존의 레이저 클리닝 방법과 레이저 유기 충격파 클리닝 방법을 이용한 웨이퍼 표면 위 미소 입자 제거를 위한 시스템을 보여 주고 있다. 고정정도 유지를 위해 Class 10의 청정 부스 안에서 실험을 수행하였으며, 펄스폭이 약 10 nsec인 Q 스위칭 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 기존 미소 입자 제거를 위해 사용하는 자외선 레이저 빔으로 4차 조화파 Nd:YAG 레이저 빔을 사용하였다. 웨이퍼의 부착을 위해 진공척(vacuum chuck)을 사용하였고, 전면적 클리닝을 위해 x-y-z 이송 테이블을 사용하였다.

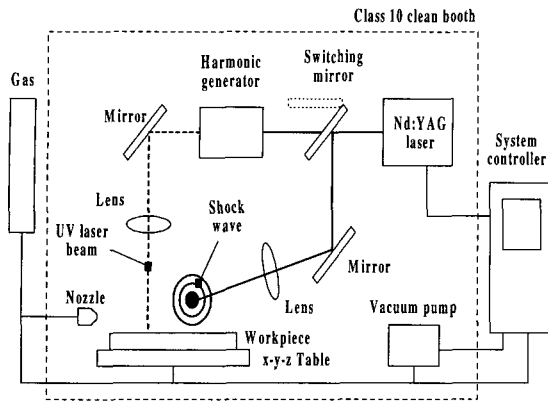


Fig. 3. Experimental system set-up for laser cleaning

제거 대상 미소 입자로 직경이 약  $1 \mu\text{m}$ 의 텅스텐 입자를 사용하였고, 회전 스프레이 방식으로 실리콘 웨이퍼 표면 위에 균일하게 도포 후 제거 실험을 수행하였다. 사용된 웨이퍼는 4 인치 p-type 실리콘 웨이퍼로 LG-Siltron사의 제품이다. 또한 정량적인 제거 효율을 알아보기 위해 KLA-Tencor 사의 Surf can 5500을 사용하여 클리닝 전-후의 입자 수를 측정하여 평가하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 기존 레이저 클리닝 방법인 자외선 레이저 빔의 직접 조사에 의한 클리닝 결과를 보여준다. 사용된 레이저 빔의 파장은  $266 \text{ nm}$ , 에너지 밀도는  $0.28 \text{ J/cm}^2$  이며, 10 펄스가 조사되었다. 상기 에너지 밀도는 실리콘 웨이퍼 소재의 손상 임계 밀도( $0.3 \text{ J/cm}^2$ )와 근접한 값이다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 처리 후 웨이퍼 표면 위 텅스텐 입자는 거의 제거가 되지 않았다.

기존 레이저 클리닝 방법을 이용한 입자 제거 시 발생하는 지배적 클리닝 힘은 순간

적 열팽창에 의한 열탄성힘( $F_e = \nu E \Delta T$ )으로 주어지는데, 텅스텐 입자의 경우 상대적으로 작은 열팽창계수( $\nu = 4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), 낮은 열전도도( $1.74 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) 및 확산도( $0.653 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ )에 의한 입자-모재 계면에서의 작은 열적 변화( $\Delta T$ )에 의해 열탄성힘이 충분히 발생하지 않는다(여기서  $E$ 는 탄성계수이다). 따라서 기존 레이저 빔의 직접 조사에 의한 클리닝 수행 시 웨이퍼의 손상 없이 텅스텐 입자와 같은 비탄성 미소 입자의 제거는 매우 어렵다는 사실을 알 수 있다.<sup>11,12)</sup>

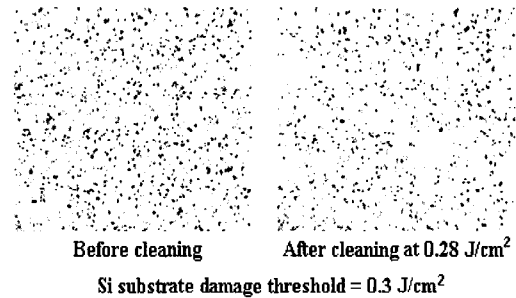


Fig. 4. Silicon wafer surfaces before and after laser treatment for the removal of tungsten particles

Fig. 5는 레이저 유기 충격파 클리닝 방법을 이용해 웨이퍼 표면 위 미소 텅스텐 입자를 제거한 후의 모습을 보여준다. 충격파 3 펄스가 조사되었으며, 이때 레이저 에너지는  $0.8 \text{ J}$  이다. 그림에서 보는 바와 같이 웨이퍼 표면 위 미소 텅스텐 입자가 성공적으로 제거되었다. 또한 클리닝된 면적의 직경이 약  $38 \text{ mm}$ 로 기존 레이저 클리닝 면적과 비교하면 약 20배 이상 큰 면적으로 클리닝이 이루어졌다. 이는 레이저 유기 충격파 클리닝 방법이 대면적 작업물에 있어 매우 빠른 속도로 클리닝을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

또한 광학 및 전자 현미경을 이용한 표면 분석 결과 클리닝 수행 후 모재에 어떠한 물리적 손상도 발생하지 않음을 확인하였다.

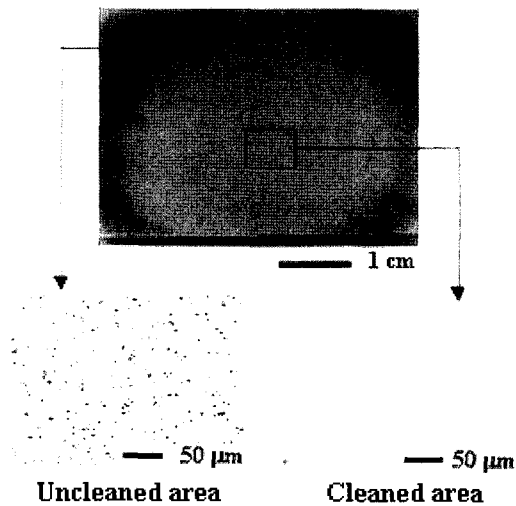


Fig. 5. Silicon wafer surfaces after laser - induced shock cleaning

레이저 유기 충격파를 이용한 미소 입자 제거 성능을 정량적으로 분석하고자 웨이퍼 표면 스캐너를 이용하여 클리닝 전 후의 입자수를 측정하였다. 전면적 클리닝을 위해 웨이퍼를 진공적에 부착시킨 후 클리닝 간격을 10 mm로 하여 웨이퍼를 전면적 직선 스캐닝을 수행하였다. 3장의 웨이퍼 클리닝을 수행하였고, 제거율(removal efficiency)은 클리닝 전후의 입자수의 변화 백분율(%)로 정의하였다.

Fig. 6은 클리닝 수행 후 오염 입자의 크기에 따른 제거율을 정량적으로 표시한 결과이다. 전체적인 평균 제거율은 최소 98% 이상이 되었다. 입자 크기를 0.2-1.0 μm, 1.0-2.5 μm, 2.5-10.0 μm 영역으로 나누어 평가를 해보면, 2.5-10.0 μm 영역에서 제거율은 약 99.9%, 1.0-2.5 μm 영역에서 제거율은 약

99.3%, 0.2-1.0 μm 영역에서 제거율은 약 98.2%로 나타났다. 결과적으로 입자 크기가 감소할수록 클리닝 효율이 감소하였다. 이는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 웨이퍼 표면에 붙어 있는 입자의 접촉힘이 입자 크기가 감소할수록 증가함에 기인한다고 사료된다.

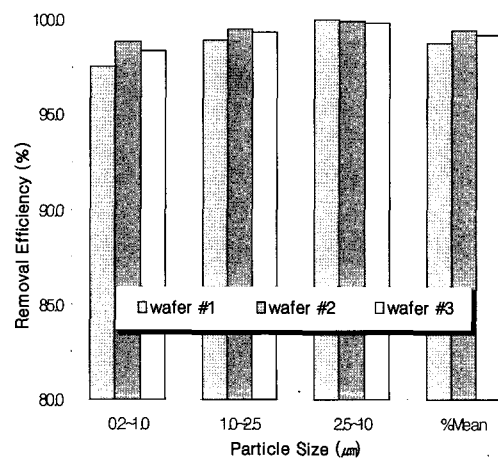


Fig. 6. Quantitative removal efficiency for different particle sizes (measured by Tencor's surface scanner)

Fig. 7은 레이저 충격파 클리닝 공정의 파라미터 중에 하나인 레이저 초점과 웨이퍼 표면간의 간격(gap distance)에 따른 텅스텐 입자 제거율의 변화를 보여 주고 있다. 간격이 약 10 mm 이상부터 급격히 제거율이 증가되어 약 6 mm에 이르면 98% 이상의 제거 효율을 보여주고 있다. 작은 간격에서 큰 입자 제거율은 표면에 도달하는 충격파의 강도가 크기 때문이며, 간격 증가에 따른 제거율의 급격한 감소는 레이저 초점에서 발생한 충격파의 강도가 거리에 따라 급격히 감소하고 있음을 의미한다( $I \sim I_0 e^{-ax}$ ,  $I$ : 거리  $x$ 에서 충격파 강도,  $I_0$ : 레이저 초점에서의 초기 충격파 강도,  $a$ : 상수)

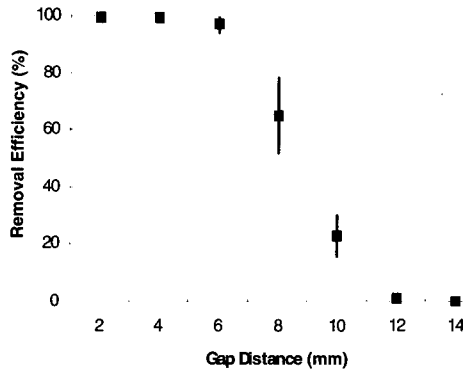


Fig. 7. Removal efficiency as a function of the gap distance between the laser focus and the wafer surface

## 5. 결론

레이저 유기 충격파 발생 원리 및 클리닝 메커니즘을 알아 보았고, 웨이퍼 표면 위 미소 텅스텐 입자 제거 실험을 통해 기존 레이저 클리닝 방법과의 특성 비교 및 제거 성능을 정량적으로 평가하였다.

웨이퍼 표면 위 미소 입자의 접촉력은 입자가 작을수록 커짐으로서 보다 제거하기 어려움을 알 수 있었다. 기존 레이저 빔의 직접 조사에 의한 미소 텅스텐 입자의 제거는 거의 불가능하였으며, 이는 텅스텐 입자의 작은 열팽창 계수 및 열저항 특성으로 인해 충분한 열탄성 클리닝 힘이 발생하지 않았기 때문이다. 기존의 클리닝 방법으로 제거가 어려운 미소 텅스텐 입자를 레이저 유기 충격파 방법으로 성공적으로 클리닝을 수행할 수 있었다. 또한 클리닝 된 면적이 커서 상대적으로 빠른 속도의 대면적 클리닝이 가능하다. 웨이퍼 표면 스캐너를 이용한 정량적 분석 결과, 입자 제거율이 평균 98% 이상이었으

며, 입자 크기가 작을수록 제거율이 약간 떨어졌다. 이는 입자 크기 감소에 따른 접촉힘의 증가에 기인한다고 사료된다. 레이저 초점과 웨이퍼 표면간의 간격을 변화시킴에 따라 입자 제거율이 크게 변화함을 알 수 있는데, 이는 충격파의 강도가 거리에 의존하기 때문이다.

결과적으로 새로운 개념의 레이저 유기 충격파 클리닝 방법은 기존의 레이저 클리닝 방법과 비교해 미소 입자 제거에 탁월하고, 클리닝 면적이 커서 빠른 속도의 클리닝을 가능케 한다.

## 참고문헌

1. 이종명, 조성호, "차세대 반도체 표면 클리닝 기술들의 특성 및 전망", 레이저가공학 회지 4 (3), pp. 22-29 (2001)
2. R. DeJule, "Trends in wafer cleaning", Semiconductor International, pp. 64-68 (Aug. 1998)
3. J. M. Lee, In-process and intelligent monitoring systems for laser cleaning process, Ph.D. thesis, Univ. of Liverpool, UK (1999)
4. 이종명, 레이저 클리닝 기술 개론, 월간레이저기술, 2-7월호 연재, 한국산업기술정보센터 (2001)
5. 이종명, 레이저와 청정가공, 한림원 (Jul. 2002)
6. J. M. Lee, K. G. Watkins, W. M. Steen, "Angular laser cleaning for effective removal of particles from a solid surface", Applied Physics A 71 (6), pp. 671-674, (2000)

7. A. C. Tam, W. P. Leung, W. Zapka, W. Ziemlich, "Laser cleaning techniques for removal of surface particulates", J. Applied Physics 71, pp. 3515-35237 (1992)
8. R. A. Bowling, Particles on Surfaces, edited by K. L. Mittal, Plenum, New York (1988)
9. J. M. Lee and K. G. Watkins, "Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock wave", J. Applied Physics 89 (11), pp. 6496-6500 (2001)
10. J. M. Lee, K. G. Watkins, W. M. Steen, "Surface cleaning of silicon wafer by laser sparking", J. Laser Applications 13 (4), pp. 154-158 (2001)
11. 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 73 (2), pp. 219-224 (2001)
12. C. Curran, J. M. Lee, K. G. Watkins, "Ultraviolet laser removal of small metallic particles from silicon wafers", Optics and Lasers in Eng., In press (2002)