

레이저 충격파 클리닝 공정에서 음향 모니터링에 관한 연구

김태훈 · 이종명 · 조성호 · 김도훈*
(주) 아이엠티, *연세대학교 금속시스템공학과

Investigation of acoustic monitoring on laser shock cleaning process

Tae-Hoon Kim, J. M. Lee, S. H. Cho and T. H. Kim*
Innovative Manufacturing Technology Co., Ltd.
*Dept. of Metallurgical System Engineering, Yonsei University

Abstract

A laser shock cleaning technology is a new dry cleaning methodology for the effective removal of small particles from the surface. This technique uses a plasma shock wave produced by a breakdown of air due to an intense laser pulse. In order to optimize the laser shock cleaning process, it needs to evaluate the cleaning performance quantitatively by using a monitoring technique. In this paper, an acoustic monitoring technique was attempted to investigate the laser shock cleaning process with an aim to optimize the cleaning process. A wide-band microphone with high sensitivity was utilized to detect acoustic signals during the cleaning process. It was found that the intensity of the shock wave was strongly dependent on the power density of laser beam and the gas species at the laser beam focus. As a power density was larger, the shock wave became stronger. It was also seen that the shock wave became stronger in the case of Ar gas compared with air and N₂ gas.

Key words : laser cleaning, acoustic monitoring, laser shock cleaning, microphone

1. 서 론

반도체 제조 공정에 있어 웨이퍼 클리닝 의 중요성은 점차 부각되고 있는 실정이다.

이는 웨이퍼 표면에 존재하는 금속, 입자 등과 같은 오염물질이 디바이스의 성능 및 수율(yield)에 큰 영향을 미치기 때문이다.¹⁾ 일반적으로 사용되고 있는 반도체 웨이퍼 클리닝 방법으로는 화학 용매와 초순수(deionized water)의 혼합액을 사용하는 RCA 습식 클리닝 방법을 들 수 있다. 그러나 다량의 유독성 화학 약품과 물의 사용에 따른 환경 문제 및 높은 유지 비용, 거대한 장비 사이즈에 의한 점유면적(footprint)의 증가 및 장비 클러스터링(clustering)의 어려움, 열악한 작업 환경, 구리 및 저유전막(low-k dielectrics) 등과 같은 신소재에 대한 부적합성 등 많은 문제점들로 인해, 이를 해결하고자 세계적으로 건식 클리닝에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.²⁻⁴⁾

이러한 건식 레이저 클리닝 기술의 하나인 레이저 클리닝 방법은 환경 친화적 클리닝 방법으로 최근 큰 각광을 받고 있다. 레이저 빔의 단색성, 직진성 같은 고유 특성으로 인해 표면에 잔재하는 오염물질을 선택적으로 제거할 수 있을 뿐만 아니라, 빔과 물질간의 상호 작용이 단시간에 일어나기 때문에 정밀한 클리닝이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 레이저 빔 그 자체의 스폿 사이즈가 작아 세정시 많은 시간을 요하며, 레이저 빔이 표면에 직접 조사되기 때문에 모재 표면에 손상을 가할 수 있다. 또한 이러한 레이저 클리닝에 사용되는 레이저 장비의 경우 보통 자외선 레이저를 사용하기 때문에 가격이 상대적으로 고가이다. 이러한 문제점들을 해결하고자, 현재 많은 응용 기술들이 연구 개발되고 있는 실정이다.²⁻⁴⁾

본 논문에서는 레이저 충격파 클리닝(laser shock cleaning)이라는 새로운 클리닝 방법을 이용하여 실제 웨이퍼 표면의 오염 입자들을 클리닝함에 있어서, 레이저 빔의 출력 밀도와 레이저빔의 초점에서의

가스 분위기 등 두 가지의 공정 파라미터의 영향을 살펴보고, 이와 동시에 충격파 발생시 생성되는 음향신호를 실시간으로 모니터링 함으로써 정량적인 공정 분석을 수행하였다.

2. 레이저 충격파 클리닝

Fig. 1의 오른쪽 그림은 레이저 유기 충격파 클리닝을 간단히 도식화한 것이다. 강력한 레이저 펄스를 클리닝 대상물 표면에 집속시키면, 공기중의 입자들이 레이저빔의 강력한 전자기장에 의해 브레이크다운(breakdown)이 일어나 이온화되며, 강력한 플라즈마를 발생시킨다. 이러한 순간적으로 발생한 플라즈마는 충격파를 발생시키고 그 충격파의 힘이 오염물의 부착력(adhesion force)보다 클 때 표면의 오염물의 제거가 가능하게 되는데, 이를 ‘레이저 충격파 클리닝(laser shock cleaning)’이라 한다.^{2,5,6)}

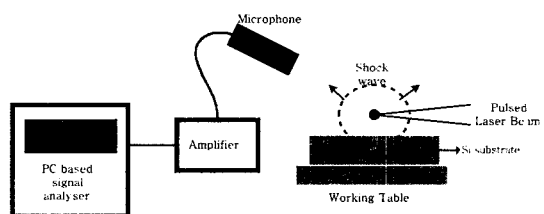


Fig. 1. Schematic diagram of an acoustic monitoring system

강력한 레이저 펄스를 공기 중에 집속시키면, 공기 중에 존재하는 입자들이 강력한 레이저빔에 의해 이온화되어 플라즈마를 발생시키며, 이러한 플라즈마는 매우 빠르게 팽창한다. 이렇게 빠르게 팽창된 플라즈마는 대기중에 충격파를 발생시키며, 동시에 손뼉을 칠 때 나는 소리와 같이 사람이 청취가 가능한 음파(acoustic wave)가

발생한다. 이때 음파를 마이크로폰과 같은 센서를 감지하여 분석함으로써 클리닝 공정의 효과적인 모니터링이 가능하다고 알려져 있다.⁷⁾

3. 실험방법

6 인치 실리콘 웨이퍼 표면에 약 0.014 μm 의 실리카(SiO_2) 입자를 균일하게 도포 후 고청정도 유지를 위해 Class 10의 청정부스 안에서 실험을 수행하였으며, 펄스폭이 약 10 nsec인 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저로부터 1064nm 파장의 레이저빔을 사용하여 충격파 클리닝을 수행하였다. 이 때 웨이퍼 표면과 레이저빔의 초점과의 거리는 4.5mm로 하였다. 레이저빔의 출력밀도와 레이저빔 초점에서의 가스 종류를 달리하여 실리콘 웨이퍼 표면의 각기 다른 부위에 클리닝을 하였으며, 세정된 면적을 비교하고자 KLA-Tencor 사의 Surfcan 5500을 사용하여 표면 분석을 하였다.

Fig. 1은 레이저 유기 충격파 클리닝시 발생하는 음향신호를 모니터링하는 시스템의 도식도이다. 레이저 유기 충격파 클리닝시, 발생하는 음파를 광대역 마이크로폰(10Hz~15kHz)을 이용하여 감지하며, 측정시 샘플링 속도는 300kHz로 하였다. 마이크로폰으로부터 감지된 음향 신호는 데이터 획득 장치(data acquisition board)에 의해 디지털화되어 PC에 저장된다. PC로 저장된 데이터들은 MATLAB을 이용하여 정량 분석하였다.

충격파에 미치는 레이저빔의 출력밀도의 영향을 조사하기 위해 $5.7 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 에서 $16.6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 까지 변화시켰으며, 레이저빔의 분위기 가스의 종류에 따른 영향을 조사하기 위해 아르곤(Ar), 순수 공기(air)와 질소(N_2)를 이용해 빔의 초점에서의 분위기 상태를 변화시켜가며 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 레이저빔의 출력밀도를 달리하여 레이저 충격파 클리닝을 수행한 후 Surfcan 5500을 사용하여 스캔한 후의 웨이퍼 표면의 모습이다. Surfcan 5500의 경우 0.1 μm 의 입자까지 감지가 가능하나 실리카 입자의 경우 도포 후 클러스터링 되기 때문에 입자 제거 유무를 확인할 수 있다. 사용된 레이저빔의 출력밀도는 $8.9 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $11.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $14 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $16.6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 였으며, 분위기 가스로는 아르곤 가스를 사용하였다. 그림에서 보여지는 클리닝 면적은 한 번의 충격파 발생으로 인해 입자가 제거된 영역을 말하며, 이러한 클리닝 면적을 구해 본 결과, 레이저빔의 출력밀도가 클수록 클리닝된 면적이 13.2 cm^2 , 24.6 cm^2 , 37.4 cm^2 , 51.5 cm^2 으로 점차 증가함을 알 수 있었다(Fig. 3). 따라서 출력밀도가 증가함에 따라 충격파의 강도 역시 증가하여 입자 제거 효율이 커진 것으로 사료되며, 이를 확인하고자 충격파 발생시 생성된 음파의 강도를 실시간으로 모니터링 하였다.

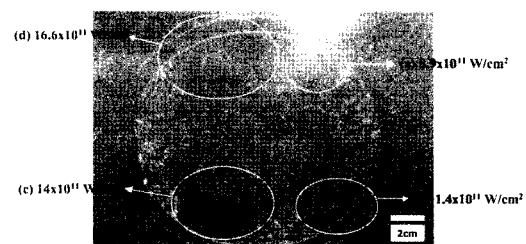


Fig. 2. The scanned image of the wafer surface: (a), (b), (c) and (d) show the cleaned area after cleaning of the wafer surface at power density of $8.9 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $11.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $14 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ and $16.6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, respectively.

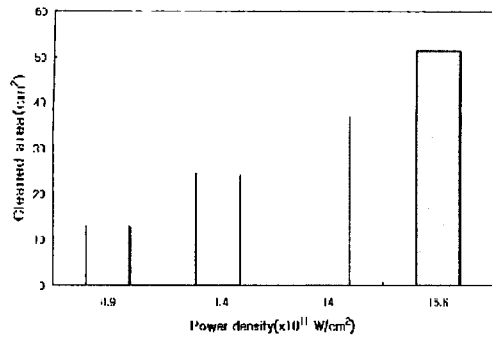
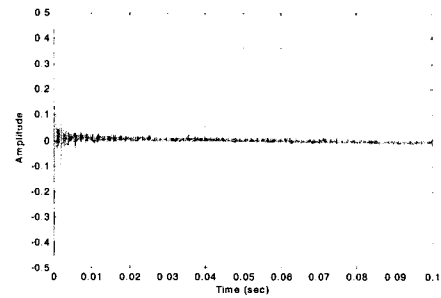
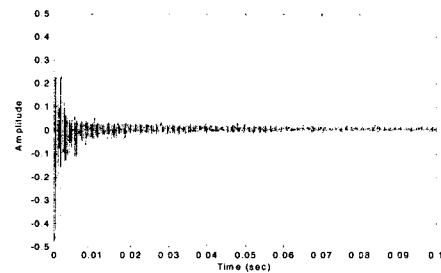


Fig. 3. The cleaned area by shock cleaning process as function of the power density of laser beam

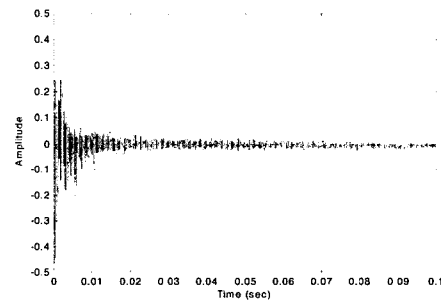
Fig. 4는 레이저 충격파 클리닝시 음향 모니터링을 통해 받은 개개의 음향 신호를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저빔의 출력밀도가 16.6×10^{11} W/cm 2 (Fig. 4 (d))에서 강력한 음파가 발생하였으며, 출력 밀도가 낮을수록 (Fig. 4 (a) 8.9×10^{11} W/cm 2 , (b) 11.4×10^{11} W/cm 2 , (c) 14×10^{11} W/cm 2) 음파의 강도가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이를 정량적으로 확인하기 위해 Fig. 4에서 나타난 음향 신호에서, 음파 발생 후 0.03sec 동안의 음파 강도에 대한 RMS(Root Mean Square) 값을 구해 본 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 출력 밀도가 낮아질수록 RMS 값이 작아짐을 알 수 있는데, 이는 곧 음파의 강도가 작아졌음을 나타내는 것이다. 따라서, 출력 밀도가 낮아질수록 충격파의 강도 역시 줄어든 것으로 생각할 수 있다. 결과적으로 레이저 충격파 클리닝시 출력 밀도 변화에 따른 충격파의 강도 변화를 음향 모니터링 방법을 이용해 쉽게 측정할 수 있었다. 레이저 출력 밀도의 증가에 따른 음파 강도의 증가는 큰 출력 밀도에서 공기 중의 입자가 쉽게 이온화하여 빠르게 더 큰 플라즈마를 생성시켜, 이 때 순간적으로 발생하는 충격파의 강도가 커짐에 기인하는 것으로 사료된다.



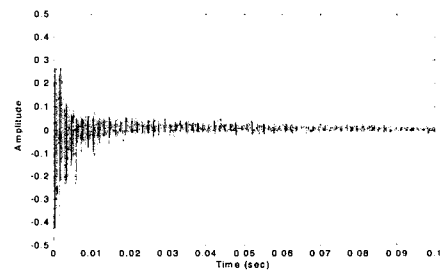
(a) 5.7×10^{11} W/cm 2



(b) 8.9×10^{11} W/cm 2



(c) 12.7×10^{11} W/cm 2



(d) 16.6×10^{11} W/cm 2

Fig. 4. Acoustic waves emitted from the shock wave during laser-induced shock cleaning process using Ar gas. A power density of laser is (a) 5.7×10^{11} W/cm 2 , (b) 8.9×10^{11} W/cm 2 , (c) 12.7×10^{11} W/cm 2 and (d) 16.6×10^{11} W/cm 2 .

Fig. 6은 레이저빔의 초점에서의 가스 분위기를 달리하여 레이저 충격파 클리닝을 수행한 결과이다. 사용된 레이저빔의 출력밀도는 $16.6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 이었으며, 분위기 가스의 종류로 아르곤(Ar) 가스, 순수 공기(air), 질소(N_2) 가스를 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 아르곤(Ar)을 사용했을 경우에 클리닝된 면적이 가장 컸으며, 순수 공기와 질소를 사용한 경우는 이에 비해 클리닝 면적이 약 30%정도 작음을 알 수 있다. 이는 충격파의 강도가 아르곤의 경우 순수공기나 질소에 비해 더 클 것이라는 사실을 실험적으로 유추할 수 있으며, 이를 실제 확인코자 음향 모니터링을 이용해 음파의 강도를 분석하였다.

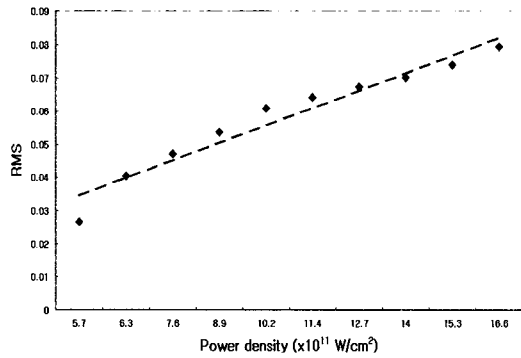


Fig. 5. RMS of acoustic emission intensity as a function of the power density of laser beam

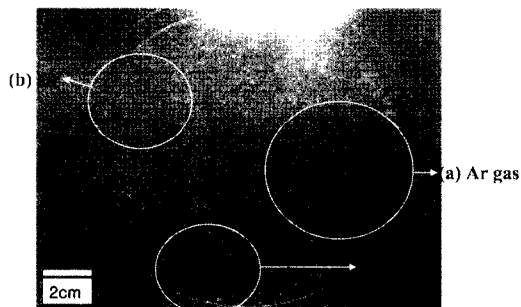
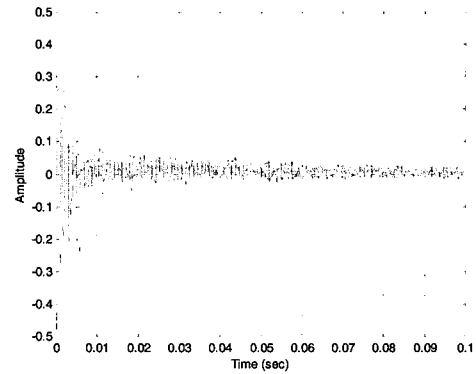
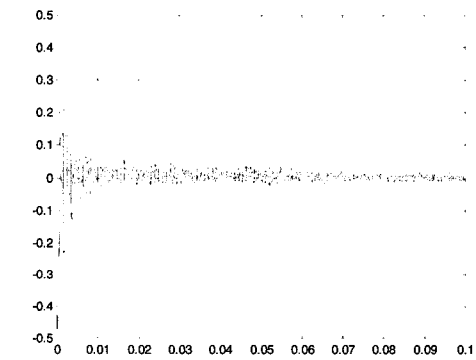


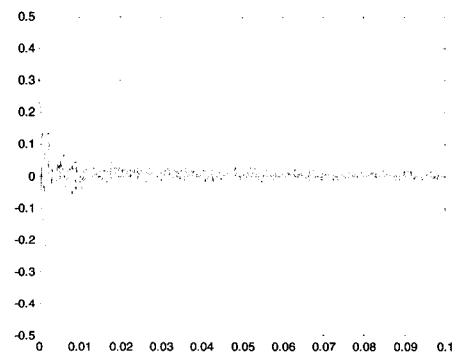
Fig. 6. The scanned image of the wafer surface : (a), (b) and (c) show the cleaned area after the cleaning of the wafer surface in the case of Ar gas, air and N_2 gas, respectively



(a) Ar



(b) air



(c) N_2

Fig. 7. Acoustic waves emitted from the shock wave during laser-induced shock cleaning process in the case of (a) Ar gas, (b) air and (c) N_2 gas

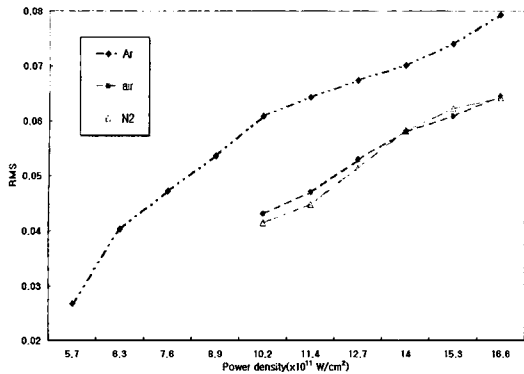


Fig. 8. RMS of acoustic emission intensity as a function of the power density; in the case of Ar gas, air and N₂ gas

Fig. 7은 분위기 가스를 달리하여 충격파 발생시 음향 모니터링을 통해 받은 음파의 모습을 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 아르곤(Ar)의 경우(Fig. 7 (a)), 다른 가스들, 즉, 순수 공기(air)나 질소(N₂)를 분위기 가스로 사용했을 때보다 좀 더 강한 음파가 발생하는 것으로 나타났다. 이 경우에도 마찬가지로 좀 더 정량화된 데이터를 얻기 위해, 음파 발생 후 0.03sec 동안의 RMS 값을 레이저빔의 출력밀도를 변화시켜 가며 얻은 데이터를 도식화한 Fig. 8에 도식화하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 아르곤의 경우가 음파의 강도가 가장 컸으며, 순수 공기가 질소에 비해서는 약간 큰 강도를 나타냄을 확인할 수 있었다. 이 역시 실제 클리닝을 수행했을 경우와 비슷한 경향을 보여주며 음파의 강도를 비교해 본 결과 순수 공기나 질소의 경우 아르곤의 경우보다 약 25%정도 작아진 음파의 강도를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 순수공기나 질소에 비해 브레이크다운(breakdown)이 일어나기 위한 출력밀도의 임계값(threshold)이 낮은 값을 보이는데 이는 아르곤이 다른 가스들보다 쉽게 플라즈마를 발생시킬 수 있음을 나타내는 것이라 할 수 있다. 실제로 아르곤과 질소에 있

어 레이저빔에 대한 가스의 브레이크다운 임계값의 경우 대략 10배 이상의 차이가 나는 것으로 알려져 있다⁸⁾. 따라서 이러한 결과들은 아르곤, 순수 공기와 질소의 플라즈마를 생성시키는데 필요한 에너지의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다.

5. 결 론

레이저 충격파 클리닝 방법을 이용한 웨이퍼 표면 위 미소 입자 제거 실험과 동시에 공정 중 발생하는 음파를 모니터링 및 신호 분석을 수행함으로써, 클리닝 공정 파라미터들의 영향에 대해 살펴보았다.

실제 레이저 충격파 클리닝을 이용한 웨이퍼 표면의 입자 제거 실험에서 레이저빔의 출력밀도와 분위기 가스가 미치는 영향을 조사해 본 결과, 출력 밀도가 클수록 클리닝 면적이 크게 나타났으며, 또한 분위기 가스로 아르곤을 사용했을 경우에 순수 공기나 질소 가스에 비해 그 면적이 상대적으로 컸다. 이와 같은 실제 실험 결과를 정량적으로 설명하기 위해 음향 모니터링 시스템을 이용하여 음파의 강도를 분석하였다. 그 결과, 레이저빔의 출력 밀도에 비례하여 충격파의 강도가 커짐을 알 수 있었고, 레이저빔의 초점에서 가스의 종류에 따라 충격파의 강도가 크게 변화함을 확인할 수 있었으며, 그 중 아르곤이 가장 효과적인 충격파 생성을 유도함을 알 수 있었다.

결과적으로 플라즈마 충격파 발생시 발생하는 음파의 신호를 실시간으로 측정, 분석함으로써 레이저 충격파 클리닝 공정의 모니터링을 효과적으로 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 이종명, 조성호, “차세대 반도체 표면 클리닝 기술들의 특성 및 전망”, 레이저가공학회지 4(3), pp. 22-29 (2001)
2. 이종명, 조성호, “레이저 유기 충격파를 이용한 웨이퍼 표면 미소입자 제거”, 레이저가공학회지 5(2), pp. 9-15 (2002)
3. 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)
4. 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)
5. 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 89 (11), pp. 6496-6500 (2001)
6. J. M. Lee, K. G. Watkins, W. M. Steen, “Surface cleaning of silicon wafer by laser sparking”, Journal of Laser Applications 13 (4), pp. 154-158 (2001)
7. 이종명, “레이저와 청정가공”, 한림원 (2002)
8. John F. Ready, “Effects of High-Power Laser Radiation”, Academic Press, pp. 220 (1971)