

엑사이머 레이저를 이용한 웨이퍼 크리닝에 관한 고찰

윤경구*, 김재구, 이성국, 최두선, 신보성, 황경현(한국기계연구원),
정재경(인하대 대학원)

The Study on Wafer Cleaning Using Excimer Laser

K. K. Yoon*, J. G. Kim, S. K. Lee, D. S. Choi, B. S. Shin, K. H. Whang(KIMM),
J. K. Jung(INHA Univ.)

ABSTRACT

The removal of contaminants of silicon wafers has been investigated by various methods. Laser cleaning is the new dry cleaning technique to replace wafer wet cleaning in the near future. A dry laser cleaning uses inert gas jet to remove contaminant particles lifted off by the action of a KrF excimer laser. A laser cleaning model is developed to simulate the cleaning process and analyze the influence of contaminant particles and experimental parameters on laser cleaning efficiency. The model demonstrates that various types of submicrometer-sized particles from the front sides of silicon wafer can be efficiently removed by laser cleaning. The laser cleaning is explained by a particle adhesion model, including van der Waals forces and hydrogen bonding, and a particle removal model involving rapid thermal expansion of the substrate due to the thermoelastic effect. In addition, the experiment of wafer laser cleaning using KrF excimer laser was conducted to remove various contaminant particles.

Key Words : Laser cleaning(레이저 크리닝), Silicone wafer(실리콘 웨이퍼), Contaminant(오염물질)

1. 서론

반도체 제조공정 중 웨이퍼를 처리하는 각 공정에서 입자, 유기물, 중금속 및 이온성 불순물 등의 오염물질이 웨이퍼 표면에 흡착되고, 이 오염물질로 인하여 웨이퍼 칩의 불량률이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 각 공정 후 오염물질을 제거하는 공정이 필요하게 된다. 웨이퍼 표면에 흡착된 오염물질을 제거하는 방법으로는 크게 습식과 건식으로 분류되는데, 현재 건식 세정은 오염물질을 충분히 제거할 수 없기 때문에 액체 및 기체 세정제의 화학작용으로 오염물질을 제거하는 습식 세정이 주류를 이루고 있다. 일반적으로 습식세정은 웨이퍼가 여러 장 들어있는 캐리어를 반송 로봇이 순차적으로 이동해서 웨이퍼를 일괄적으로 약액(산 또는 암모니아) 또는 수세조에 넣어서 세척한 후 웨이퍼를 회전시켜 건조한다. 이와 같은 습식 세정 장비는 까다로운 조건하에서 작동되며, 로봇의 저발전성, 반송신뢰성,

고속성, 내약품성 등이 필요하며, 반송의 신뢰성이나 고속 반송을 위하여 고기능의 모터를 사용하여야 하고 또한, 내약품성에 대해서도 특수한 재질을 선택하여 불소수지에 의한 이중의 봉인(seal)을 해야 한다. 습식 세정 외의 방법으로는 스크루버(Scrubber)라고 불리는 장비를 사용하는데, 웨이퍼를 회전시키며 그 표면에 순수한 세정액을 분출하며 입자를 브러시로 세척하는 방식이고, 고압에서 순수를 분사하여 입자를 제거하는 방식과 고주파의 초음파를 발진시켜 그 진동력으로 입자를 떨어뜨리는 방식 등이 사용되고 있다. 앞서 서술한 웨이퍼 세정방식은 반도체 웨이퍼에 있는 오염물질을 제거하기 위하여 순수나 화학물질을 사용하고 있어, 그 공정에 있어서 비효율적인 순수의 사용(2,000 gallon/Wafer)과 화학물질을 사용함으로써, 다량의 VOC류(IPA, Aceton), 산류(불산, 황산), 솔벤트류가 발생 및 폐수처리 등의 문제를 야기하며, 공정의 복잡함에 따른 부수적인 비용이 많이 발생하는 문제점을 가지고 있다.(1)

레이저를 이용한 새로운 웨이퍼 세정 방법은 웨이퍼에 얇은 펄스와 높은 피크(peak) 출력의 레이저를 조사함으로써 정전기로 인해 결합된 오염물질을 웨이퍼 상에서 분리시킨 후 강한 질소가스 등의 불활성 가스를 노즐을 통해 분출함으로써 오염물질을 제거하는 방법이다. 이러한 레이저 웨이퍼 세정방법은 습식 세정 방법에서의 화학물질을 대체할 수 있는 청정공정으로서 위에서 언급한 화학물질의 재처리, 폐수처리 등을 원천적으로 제거할 수 있을 뿐 아니라 기존의 오염물질의 제거를 위한 다단계 처리공정을 한 단계의 공정으로 줄일 수 있다. 또한, 화학물질을 제거하는 공정에서 발생하는 잔여물을 통한 오염자체를 막을 수 있으며, 화학공정을 위한 파이프 등의 설치 및 배수 설비가 제거됨으로서 작업공간을 혁신적으로 줄일 수 있게 된다. 그리고, 레이저를 이용한 웨이퍼 세정방법은 국소부위를 선택적으로 세정가능하고, 기존의 공정에서 난점을 보이는 모서리부분의 오염물질제거 등에 탁월한 효과를 발휘할 수 있으며, 표면과 입자사이의 반데르 발스 힘의 증가로 인해 제거가 어려운 1 마이크로 이하의 오염물질을 제거 가능하다.^(2~3)

특히, 엑사이머 레이저는 자외선 영역의 짧은 파장(248nm)과 높은 빔 세기에 의한 낮은 열영향을 가짐으로서 웨이퍼를 비롯한 반도체 분야에서의 세정에 폭넓게 활용 가능하다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 위에서 서술한 바와 같이 기존에 웨이퍼 세정방법에 비해 많은 장점을 가지고 있는 레이저를 이용한 웨이퍼 세정방법을 서술하고자 한다.

2. 레이저 크리닝의 기본 원리

레이저 크리닝 기술은 두가지로 나눌 수 있다. 첫째로는 오염된 표면에 물이나 물과 알코올의 혼합물을 이용하여 얇은 액체막을 형성시킨 후 CO₂(10.6μm)나 엑사이머 레이저(248nm)를 조사시키는 방법으로 레이저 빔이 열원으로 작용하여 액체막을 가열하여 액체막의 폭발적인 증발로 인해 오염물질을 제거하는 방법이다. 두 번째로는 건식 레이저 크리닝으로 물과 같은 중간 매개체를 사용하지 않는다.⁽⁵⁻⁶⁾ 이 방법은 짧은 펄스(수 ns) 레이저 빔이 오염된 표면과 오염물질에 강력하게 흡수되어 표면과 오염물질의 빠른 열팽창에 의해 표면으로부터 외부 방향으로의 입자 가속이 일어나게 됨으로서 오염물질이 제거되게 된다. 특히, 엑사이머 레이저를 이용한 건식 레이저 크리닝은 매우 짧은 파장으로 인한 강력한 흡수로 인하여 매우 효율적인 열팽창이 일어남으로서 직접적으로 흡착력을 단락시켜 매우 다양한 종류의 오염물질을 제거 가능하다.

Fig. 1은 건식 레이저 크리닝의 기본 메카니즘을

간단하게 그림으로 나타낸 것으로 레이저 빔을 오염된 표면에 조사시켜서 표면과 오염입자를 분리시킨 후 가스를 불어주어서 분리된 오염물질을 제거하는 과정을 나타낸 것이다.

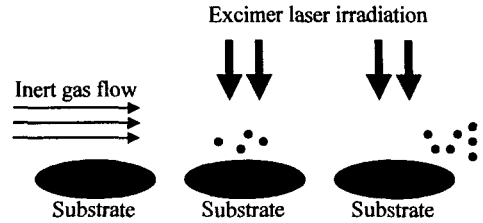


Fig. 1 Laser Cleaning mechanism

3. 엑사이머 레이저 크리닝 모델링

효율적인 레이저 크리닝을 위해서는 오염물질의 흡착력보다 큰 제거력이 필요하다. 재료 표면과 오염물질 입자 사이의 상호 작용력은 긴 영역과 짧은 영역에 관련된 힘으로 나눌 수 있다. 긴 영역에 관련된 힘으로는 반데르 발스(van der Waals) 힘, 모세관(capillary)력, 정전기(electrostatic), double-layer 힘 등이고 짧은 영역에 관련된 힘은 금속 결합, 전자 결합, 이온 결합, 수소 결합과 같은 여러 가지 화학적 결합력이다. 특히, 긴 영역에 관련된 힘은 반데르 발스 힘이 대부분을 차지하고, 짧은 영역에 관련된 힘은 수소 결합이 가장 중요하다.⁽⁴⁾

반데르 발스 힘은 재료 물성치가 Lifshitz-van der Waals 상수와 관련된 미세적 접근(microscopic approach)⁽⁷⁾을 이용하여 계산될 수 있다. 구형의 입자와 부드러운 표면에 대해, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F^V = F_0^V + F_{Deformation}^V = \frac{h\omega_{132}r_p}{8\pi z_0^2} + \frac{h\omega_{132}a^2}{8\pi z_0^3} \quad (1)$$

식 (1)의 첫 번째 항은 변형이 일어나기 전의 구와 표면 사이의 반데르 발스 힘을 나타내고 두 번째 항은 탄성이나 소성 변형으로 인한 접촉면에 작용하는 힘을 나타낸다. 여기서, $h\omega_{132}$ 는 Lifshitz-van der Waals 상수, r_p 는 입자 직경, z_0 는 입자와 표면의 원자 분리 거리(0.4~1nm로 가정), a 는 입자에서 변형 영역의 반경이다. a 의 경우 강체 입자(SiO₂와 Al₂O₃)에 대해서 JKR 모델⁽⁸⁾을 사용해서 계산되고, PSL 입자에 대해서는 Rimai와 Demejo에 의해 구해진 값을 사용한다.

무기질 입자와 친수성 실리콘 표면 사이의 수소 결합으로 인한 흡착력은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$F_{H-bond} = DE_{bond}(\pi a^2 + 2\pi r_p \Delta z b) / d_{bond} \quad (2)$$

여기서 D 는 입자 표면 OH group 밀도(Al_2O_3 에 대하여 12.5 OH/nm^2)이고 E_{bond} 는 입자와 표면 사이의 수소 결합 상호작용 에너지이다. E_{bond} 는 표면 특성에 의존하고 특히 재료의 전기적 구조와 수산화(hydroxylation) 정도에 따라 결정된다. O-H-O 수소 결합의 평균 에너지는 약 $5 \text{ kcal/mole} (\sim 0.48 \text{ eV/bond})$ 이고, πa^2 는 입자의 변형 영역, 그리고 $2\pi r_p \Delta z$ 는 물분자의 사슬에 의해 입자와 표면이 결합되는 확률 b 로 접촉면 부근의 높이 Δz 에서 얻어지는 링(ring) 영역의 면적이다. d_{bond} 는 수소 결합 분리 거리로 수소 결합 거리의 절반이라 가정한다. PSL 입자의 경우에서 수소 결합이 일어나지 않고, 단지 반데르 발스 힘만이 주요 역할을 한다.

식 (1)과 식 (2)를 이용하여, 친수성 실리콘 표면에 접촉하고 있는 유기 입자, PSL 입자, 유기 입자 등에 대해 입자 직경에 대한 흡착력을 계산할 수 있다. 계산에 의하면 흡착력은 입자 직경에 선형적으로 비례하는 것을 알 수 있다.

레이저 펄스가 조사되면, 오염 입자와 실리콘 표면은 레이저 에너지를 흡수하고 빠르게 가열된다. 열탄성 효과에 의해 실리콘 기질의 매우 빠른 열 팽창은 표면으로부터 오염입자를 배출하게 된다. 이 분리력을 계산하기 위해서는 레이저 빔 조사로 인한 오염 입자와 실리콘 기질의 온도 증가를 알아야 한다. 실리콘 표면의 레이저 빔 흡수에 의한 온도 증가는 유사 무한 일차원 열 식으로 근사될 수 있다. 표면과 대기간의 열 전달은 매우 느리고, 복사 손실은 레이저 에너지에 비해 매우 작으므로 표면에서 열 손실은 무시한다. 일차원 열전달 식은 유한 요소법을 이용하여 계산되어질 수 있다. 입자의 경우에는 작은 입자 크기로 인해 일정하지 않은 표면 레이저 흡수율 때문에 온도 분포의 계산이 매우 복잡하다. 그런데, 입자가 레이저 에너지를 약하게 흡수하여 레이저가 조사되는 동안 입자에서 온도 증가는 크지 않으므로 서브 마이크론 크기의 입자는 레이저가 조사되는 동안 일정한 온도를 유지하고 있다고 가정한다. 레이저 펄스 조사에 의한 기질에서의 빠른 온도 증가는 조사되는 영역에서 응력(stress)과 변형(strain)을 생성시킨다. 이 변형은 입자들을 이동시키게 된다. 입자 상에서 변형 저항은 기질 상에서의 응력과 동일하게 기질 표면으로부터의 분출력에 영향을 받게 된다. 응력과 변형의 관계를 기본으로 기질의 열 팽창에 의해 일어나는 입자에서 열적 분리력은 다음

과 같이 얻어질 수 있다.

$$F_{thermal} = \gamma E \pi a^2 \Delta T \quad (3)$$

여기서 γ 는 선형 열팽창계수, E 는 탄성계수, 그리고 ΔT 는 기질 표면에서 온도 증가량이다. πa^2 는 입자의 변형 영역의 면적이다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 열적 분리력은 입자의 변형 영역에 의존한다. 따라서, PSL과 같은 강성이 약한 입자는 SiO_2 와 Al_2O_3 와 같은 강성이 강한 입자보다 기질에서 더 강한 분리력을 받게 된다.

4. 실험 장치

레이저 크리닝의 실험 장치의 개념도를 Fig. 2에 간단하게 나타내었다. 레이저는 파장 248 nm , FWHM 22 ns 인 KrF 엑시머 레이저(Lumonics EX888)를 사용하였으며, 레이저 빔의 에너지 밀도를 높이기 위해 원통형(cylindrical) 렌즈 4개를 이용하여 빔을 축소할 수 있는 시스템을 꾸며고, 넓은 영역을 스캔하여 크리닝할 수 있도록 X-Y 스테이지를 설치하였다. 또한, 시편 표면에 레이저가 조사된 후 분리되는 오염물질을 제거하기 위해 가스 노즐을 설치하였으며, 가스는 질소가스를 사용하였다. 질소 가스는 압력을 2 kgf/cm^2 으로 고정하고, 노즐을 스테이지의 측면에 고정시켜 크리닝을 위한 시편 표면으로 불어주었다.

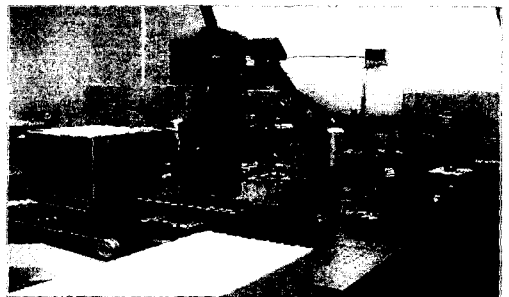
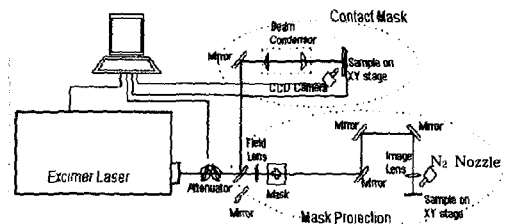


Fig. 2 Schematic of Laser Cleaning System

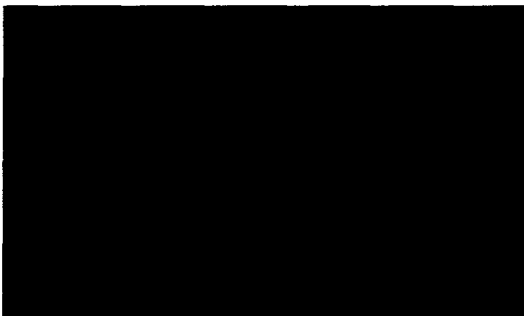
5. 실험 결과

실험은 실리콘 웨이퍼에 청정실 조건에서 wafer에 부착되기 쉬운 유기물질(지문)과 먼지등을 임의로 오염시킨 것을 시편으로 사용하여, 엑사이머 레이저를 이용한 건식 레이저 크리닝 효과를 알아보았다. 측면에서 질소가스를 일정 압력으로 계속하여 불어주면서 오염된 웨이퍼에 레이저 빔을 수직으로 조사시키면서 실험을 실시하였다.

Fig. 3은 레이저 크리닝 전과 후의 차이를 비교한 것이다. Fig. 3(a)는 유기물질(지문)과 먼지등이 웨이퍼 표면에 부착되어 있는 것을 보여 주고 있으며, Fig. 3(b)는 레이저 에너지 $1.52\text{J}/\text{cm}^2$, 반복율 10Hz, 그리고 펄스수가 30번인 조건으로 크리닝한 후의 wafer 표면 상태로 거의 모든 오염물질들이 제거되어 매우 깨끗한 상태를 보여 주고 있다. 따라서, 앞서 모델링한 식에서 볼 수 있듯이, 강성이 약한 오염입자들이 웨이퍼 표면에 부착되었을 경우 건식 레이저 크리닝이 매우 효과적으로 오염물질을 제거할 수 있는 것을 알 수 있다.



(a) Before



(b) After

Fig. 3 Morphology of contaminated wafer surface and cleaned wafer surface($\times 150$) : (a) Contaminant - organic particle and dust, (b) Cleaning parameter - $1.52\text{J}/\text{cm}^2$, 10Hz, 30 shots

그러나, CMP 작업 후의 강성이 강한 슬러리 잔유물의 크리닝의 경우에는 앞서 기술한 유기물질과 같은 강성이 약한 오염입자에 비해 높은 레이저 에너지가 필요하고, 어느정도의 전처리 과정을 거쳐야 레이저 크리닝 효과를 볼 수 있었다.

실험에 의한 크리닝 결과는 모델링에 의해 예측되어진 유형을 나타내었으며, 각 오염물질에 따라서 각각의 최적 크리닝 조건을 찾아야 한다는 것을 보여주고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 엑사이머 레이저를 이용한 웨이퍼 레이저 크리닝의 전반적인 원리를 알아보고, 이론적으로 모델링하였으며, 실제적인 실험을 통하여 레이저 크리닝의 효과를 알아 보았다.

엑사이머 레이저를 이용한 웨이퍼 크리닝 방법은 기존의 방법에 비해 간단하고 비용이 적게 들어 많은 장점을 가지고 있다. 보다 발전된 레이저 크리닝 모델을 개발하고 이에 따른 레이저 크리닝의 최적조건을 결정한다면 기존의 웨이퍼 세정방법을 대체할 수 있는 효과적인 방법으로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Y. F. Yu and Y. Aoyagi, "Laser cleaning- a new surface cleaning method without pollution," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 344, pp. 329-334, 1994.
2. A. C. Tam, H. K. Park, C. P. Grigoropoulos, "Laser cleaning of surface contaminant," *Applied Surface Science*, Vol. 127-129, pp. 721-725, 1998.
3. "The Radiance Process," URL:<http://www.radiance-process.com/>
4. M. Meunier, X. Wu, F. Beadoin, E. Sacher and M. Simard-Normandin, "Excimer laser cleaning for microelectronics: Modeling, applications and challenges," *SPIE Proc.*, Vol. 3618, pp. 290~301, 1999
5. K. Imen, S. J. Lee, and s. d. Allen, *Appl. Phys. Lett.* 58., p. 203, 1991
6. W. Zapka, W. Ziemlich, and A. C. Tam, *Appl. Phys. Lett.* 58., p. 2217, 1991
7. E. M. Lifshitz, *Sov. Phys. JETP*, 2, p. 73, 1956
8. K. L. Johnson, K. Kendall and A. D. Roberts, *Proc. R. Soc. London A324*, p. 301, 1971
9. M. B. Ranade, *Aerosol Sci. Tech.* 7, p. 161, 1987
10. R. G. Greenler, *J. Chem. Phys.*, 37, p. 2094, 1962