

펄초레이저 충격파에 의한 형광 나노입자 제거

Removal of Nano-scaled Fluorescence Particles on Wafer by the Femtosecond Laser Shockwave

박정규¹, 조성학^{1,✉}, 김재구¹, 장원석¹, 황경현¹, 유병현², 김광열³
 Jung-Kyu Park¹, Sung-Hak Cho^{1,✉}, Jae-gu Kim¹, Won-seok Chang¹, Kyung-Hyun Whang¹,
 Byung-Heon Yoo² and Kwang-Ryul Kim³

¹ 한국기계연구원 나노융합기계 (Nano-mechanical systems, Korea Institute of Machinery & Materials)

² 한국과학재단 (Korea Science and Engineering Foundation)

³ 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 (Department of electronics and computer engineering, Hanyang university)

✉ Corresponding author: shcho@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7077

Manuscript received: 2008.11.25 / Accepted: 2009.2.10

The removal of tiny particles adhered to surfaces is one of the crucial prerequisite for a further increase in IC fabrication, large area displays and for the process in nanotechnology. Various cleaning techniques (wet chemical cleaning, scrubbing, pressurized jets and ultrasonic processes) currently used to clean critical surfaces are limited to removal of micrometer-sized particles. Therefore the removal of sub-micron sized particles from silicon wafers is of great interest. For this purpose various cleaning methods are currently under investigation. In this paper, we report on experiments on the cleaning effect of 100nm sized fluorescence particles on silicon wafer using the plasma shockwave occurred by femtosecond laser. The plasma shockwave is main effect of femtosecond laser cleaning to remove particles. The removal efficiency was dependent on the gap distance between laser focus and surface but in some case surface was damaged by excessive laser intensity. These experiments demonstrate the feasibility of femtosecond laser cleaning using 100nm size fluorescence particles on wafer.

Key Words: Femtosecond Laser (펄초 레이저), Plasma (플라즈마), Shockwave (충격파), Nano-particle (나노 입자), Dry Cleaning (건식 세정)

1. 서론

현재 반도체 산업에서 실리콘 웨이퍼 위의 오염물질들을 제거하거나 조절하는 기술은 큰 이슈가 되고 있다. 반도체 기술이 집적화 되고 패턴 크기가 작아짐에 따라서 반도체 가공 공정 중에 요구되는 청정도는 높아지고 있으며 또한 가공 중에 발생하는 미세 오염물에 대한 고효율 세정 기술이 요구되고 있는 것이다. 반도체 공정기술이 발전하고 집적화될수록 웨이퍼 공정 중에 발생되

는 불순물의 입자들은 더 작아지고 있다. 하지만 불순물 입자가 작아질수록 그것들이 표면에 응집되는 힘은 더 커지기 때문에 작은 입자일수록 제거하기가 더 어려워지고 있다.¹

현재 실리콘 웨이퍼의 세정방법으로는 크게 건식세정(dry cleaning)과 습식세정(wet cleaning)으로 나뉘어 사용되고 있다. 여기서, 습식세정법은 일정량의 탈이온수로 희석된 불화수소와 같은 산성 세정액을 내부 저장조에 공급하고, 방출구를 통하여 외부 저장조로 유입하여 저면에 구비된 드레인 라

인을 통해서 외부로 방출한 다음, 각 내부 저장조 내부에 일련의 반도체 제조공정이 수행된 웨이퍼를 투입하여 산화막 또는 금속이온 등을 제거하는 세정공정을 수행하고, 많은 양의 탈이온수를 연속적으로 공급함으로써 액성을 중화하는 방식으로 이루어지고 있다.

이와 같은 습식세정법은 상술한 바와 같이 많은 양의 탈이온수(de-ionized water)나 화학 작용제(chemical agent)를 필요로 하기 때문에 환경오염을 유발시킨다는 문제점이 있다.^{2,3}

반면 실온, 상압에서 적용가능하고 높은 효율성과 더불어 청정 공정으로 이루어지는 건식세정의 장점이 부각되고 있다. 이러한 건식세정 방법 중에서도 실온, 실압에서 적용가능하고 높은 효율성과 더불어 청정 공정으로 이루어지는 레이저 건식세정의 장점이 부각되고 있다.^{4,9}

레이저 세정은 메커니즘 차이에 따라 스팀 레이저 세정 메커니즘(steam laser cleaning mechanism), 열분리(thermal detachment), 표면음파(surface acoustic wave), 플라즈마 충격파(plasma shock wave)로 구분될 수 있다.

이 중에서도 플라즈마 충격파에 의한 레이저 건식세정방법은 열적 기질을 확장시킬 수 있으며, 입자에서 영역이 향상됨에 따라 부분적인 기질을 제거할 수 있고, 공기로부터 흡수된 습기의 폭발적인 증발효과를 나타낸다는 장점이 있다.

그러나 종래에는 나노초 단위의 레이저를 사용하여 레이저 건식세정을 수행하였기 때문에 상술한 바와 같은 폭발적인 증발효과에 의한 세정을 수행하기 위해서는 더 큰 레이저 에너지가 필요하다는 문제점이 있었다.

또한, 종래 나노초 레이저를 이용한 웨이퍼의 건식세정방법에 의해 웨이퍼 상의 오염물질을 제거하는 경우에는 웨이퍼에 수직 방향으로 레이저를 조사하였기 때문에 고출력에 의하여 웨이퍼의 표면이 열적으로 손상된다는 문제점이 있었으며, 대물렌즈를 이용하여 세정 영역을 국부적인 점 형태로만 구현하였기 때문에 광대역에는 적합하지 않다는 문제점도 있었다.

아울러 종래 나노초 레이저를 이용한 웨이퍼의 건식세정방법에 의하여 웨이퍼 상의 오염물질을 세정하는 경우, 세정효과에 있어서도 웨이퍼 상에 있는 형광 나노입자를 50~60% 정도밖에 제거하지 못하여 세정방법으로서의 효율성이 충분하지 못하다는 문제점이 있었다.¹⁰⁻¹²

펨토초 레이저와 같은 극초단 펄스 레이저(ultra short pulse laser)는 낮은 레이저 에너지로도 짧은 펄스폭에 의한 높은 침투출력이 가능하여 플라즈마를 생성시킬 수 있다. 펄스가 존재하는 시간이 짧아 시편에 미치는 열적인 효과는 거의 무시되므로 펨토초 레이저의 주된 세정 메커니즘은 플라즈마 충격파에 의한 것으로 볼 수 있다. 이 논문에서는 기존에 연구되었던 나노초 레이저 건식 세정에 비하여 웨이퍼에 가해지는 손상이 적고 높은 세정효과를 가질 수 있는 펨토초 레이저에 의하여 형성된 충격파에 의한 건식 세정 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 레이저는 Quantronix 사의 Integra-I 모델로써, 근적외선 영역인 790nm 에서 최적의 증폭이 이루어지고, 펄스폭(FWHM) 100fs, 펄스에너지 3.5mJ, 반복률 1kHz 를 갖는 고출력 펨토초 레이저이며 구체적인 레이저의 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1 Specification of the femtosecond pulsed laser

Laser source	Ti:Sapphire
Wavelength	$\lambda = 790 \text{ nm}$
Pulse energy	3.5 mJ/1 kHz
Pulse duration	100 fs
Beam Diameter	8 mm
Beam Quality(M2)	≤ 1.8
Beam Mode	TEM ₀₀ Gaussian

세정 효과를 판단하기 위해서는 레이저 장비에서부터 세정 후 결과를 비교할 수 있는 나노파티클 카운터까지 완벽한 크린룸에서 운영되어야 하는 제한이 있다. 따라서 이러한 제한을 피하고자 형광입자를 도포한 웨이퍼를 형광현미경(fluorescent microscope: Model No. Carl Zeiss Axiovert 200M)으로 관찰함으로써 세정성능을 평가하는 방법을 사용하였다. 형광 입자를 이용한 실험은 형광발현 되는 입자의 제거 여부로 세정 효과를 확인하게 되므로 레이저 세정 전후에 개입 될 수 있는 오염원으로부터 영향을 받지 않는 장점이 있다. 실험에는 폴리머 계열의 100nm 급 나노입자를 제조하고 이를 증류수에 용해시켜 20mm×20mm 크

기로 절단한 웨이퍼에 도포한 후 건조한 시편을 사용하였다.

세정실험은 펨토초 레이저 출력을 1.15W 로 고정시킨 후 20x(NA0.4) 대물렌즈를 사용하여 0.5mm/s 속도로 스캔하는 방법으로 진행하고 레이저와 시편사이는 Air 블로잉(blowing) 및 석션(suction)으로 재오염 되는 것을 방지하였다(Fig. 4). 웨이퍼와 레이저 초점과의 거리가 유일한 실험변수이며, 레이저 조사 후 이를 형광현미경(fluorescence microscope)으로 관찰하여 잔류 형광입자 결과를 비교하였으며, 국부적이며 선택적인 세정 효과를 확인하기 위하여 주사전자현미경(scanning electron microscope)을 이용하여 형광 나노입자의 제거를 확인하였다.

2.1 레이저 수직 조사 세정 실험

Fig. 1 과 같이 웨이퍼에 펨토초 레이저를 수직 방향으로 조사하여 형광나노입자들의 세정효과와 실리콘 웨이퍼 기판의 표면에 대한 손상을 광학현미경과 형광 현미경을 이용하여 관찰하였다. 펨토초 레이저 출력을 1.15W 로 고정시킨 후 20x(NA0.4) 대물렌즈를 사용하여 레이저 빔을 수직으로 조사하여 레이저의 집광에 의한 플라즈마와 충격파(shockwave)의 형성지점과 시편 사이는 250 μm 로 고정 시켰으며, 에어블로잉(Air blowing) 및 석션(suction)으로 재오염 되는 것을 방지하였다. 웨이퍼와 레이저 초점과의 거리를 250 μm 로 고정 시켰으며, 레이저 빔을 수직으로 입사시켰을 때의 세정 효과 및 웨이퍼 손상도를 알아보기 위하여 레이저 조사 후 이를 광학현미경과 형광현미경으로 관찰하여 잔류 형광입자 결과를 비교하였다.

Fig. 2 의 결과에서 알 수 있듯이 수직으로 입사된 펨토초 레이저 빔의 세정 효과는 뛰어나지만

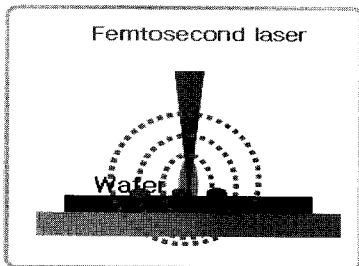


Fig. 1 Experimental setup for the removal of particles from silicon wafers using femtosecond laser induced shockwave (vertical irradiation)

레이저 산란빔에 의한 실리콘 웨이퍼 기판에 손상(damage)을 줄 수밖에 없고 세정 영역 또한 매우 국부적이라는 것을 알 수 있다. 따라서 웨이퍼에 레이저 빔 축과 평행하게 웨이퍼 표면을 일치시킨 후 손상 방지를 위한 갭(gap)을 두는 방법을 필요로 한다는 것을 알 수 있다.

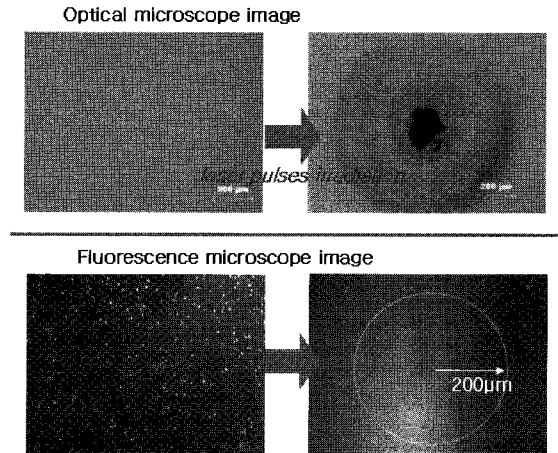


Fig. 2 Optical and fluorescence micrographs of the silicon wafer surface for the removal of small 100nm sized fluorescence particles

2.2 레이저 평행 조사 세정 실험

본 실험에서는 웨이퍼를 수직으로 고정시킨 후 웨이퍼와 펨토초 레이저 초점간의 거리를 50 μm 씩 변화를 주면서 플라즈마 충격파(plasma shockwave)에 의한 웨이퍼 손상 여부를 확인하였다. 펨토초

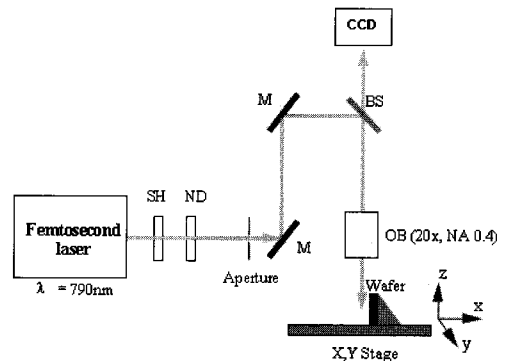


Fig. 3 Schematic of femtosecond laser cleaning system [SH: shutter, ND: neutral density filter, M: mirror, BS: beam splitter, HL: halogen lamp, OB: objective lens, CCD: CCD camera]

레이저를 이용한 세정 시스템의 개략도는 Fig. 3 과 같고, Fig. 4 에서는 실험에 사용된 레이저 충격파가 실리콘 웨이퍼와 평행하게 입사되는 시스템에서의 샘플 홀더 및 개략도를 나타낸다.

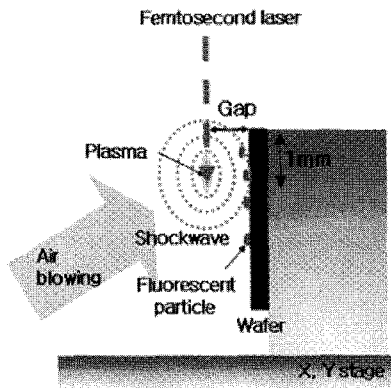


Fig. 4 Experimental setup for the removal of particles from silicon wafers using femtosecond laser induced shockwave (parallel irradiation)

펨토초 레이저 출력을 일정하게 하고 초점을 웨이퍼 상단으로부터 1mm 아래에 위치한 후, 웨이퍼와 나란하게 일정한 속도로 스캔하고 그 결과를 광학현미경으로 관찰하였다. 그 결과 Fig. 5 에 나타난 것과 같이 레이저 초점과의 거리 50 μm 에서는 직접적인 웨이퍼 손상이 발생하였음을 알 수 있다. 100 μm 에서는 초점을 지난 부분에 Kerr 효과에 의한 것으로 보이는 손상이 관찰되었으며 150 μm 조건에서는 어떠한 영향도 관찰되지 않았다. 따라서 실험과 같은 레이저 조건에서 웨이퍼 손상을 방지할 수 있는 최소 갭 간격은 100~150 μm 사이로 판단할 수 있으며, 산란 빔에 의한 웨이퍼 손상 방지도 병행되어야 할 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 레이저에 의한 웨이퍼 손상

웨이퍼에 레이저를 수직방향으로 조사하는 세정 방법은 표면에 손상을 줄 수밖에 없고 세정 영역 또한 국부적이다. 때문에 웨이퍼에 레이저 빔 축과 나란하게 웨이퍼 표면을 일치 시킨 후 손상 방지를 위한 갭(gap)을 두는 방법을 사용한다. 본 실험에서는 웨이퍼를 수직으로 고정시킨 후 웨이퍼와 펨토초 레이저 초점간의 거리를 50 μm 씩 변

화를 주면서 플라즈마 충격파(plasma shockwave)에 의한 웨이퍼 손상 여부를 확인하였다. 펨토초 레이저 출력을 일정하게 하고 초점을 웨이퍼 상단으로부터 1mm 아래에 위치한 후, 웨이퍼와 나란하게 일정한 속도로 스캔하고 그 결과를 광학현미경으로 관찰하였다. 그 결과 Fig. 5 에 나타난 것과 같이 레이저 초점과의 거리 50 μm 에서는 직접적인 웨이퍼 손상이 발생하였음을 알 수 있다. 100 μm 에서는 초점을 지난 부분에 Kerr 효과에 의한 것으로 보이는 손상이 관찰되었으며 150 μm 조건에서는 어떠한 영향도 관찰되지 않았다. 따라서 실험과 같은 레이저 조건에서 웨이퍼 손상을 방지할 수 있는 최소 갭 간격은 100~150 μm 사이로 판단할 수 있으며, 산란 빔에 의한 웨이퍼 손상 방지도 병행되어야 할 것이다.

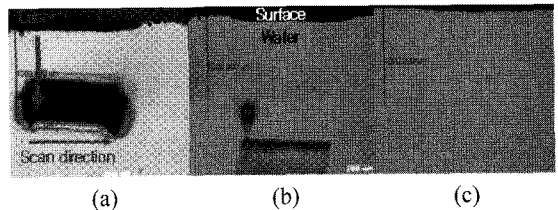


Fig. 5 Microscope images of damaged wafer with different focus distance (a)50 μm (b)100 μm (c)150 μm [Power: 1.15W, Velocity: 0.5mm/s]

3.2 형광 입자를 이용한 펨토초 레이저 세정

레이저 세정 효과실험은 크린룸 시설에서 실험과 검사가 이루어져야 하는 제약이 있으나, 100nm 급 형광 폴리머 입자가 도포된 웨이퍼를 이용하고 형광 현미경으로 세정 전후를 비교함으로써 보다 용이하게 그 특성을 확인하였다.

Fig. 6 은 레이저 초점과 웨이퍼와의 거리(D)에 따른 세정 효과를 형광현미경으로 관찰한 그림이다. 갭 간격 50 μm 에서는 형광 입자가 완전히 제거된 모습이나 웨이퍼 손상에 의한 것으로 세정이라 할 수 없다. Fig. 6 의 (c)~(e)에서는 형광입자 웨이퍼 제작 시 물결 형태로 고착된 흔적까지 제거되는 세정 효과를 볼 수 있었으며, 그 이상에서는 비교적 큰 입자만 제거되었을 뿐 미세한 입자에 대한 세정 효과는 크지 않았다.

정량적인 세정 효과 비교를 위해 형광현미경 관측한 사진을 각각 500×500pixel 의 일정한 크기로 잘라낸 후 상용 이미지 분석 프로그램 iSolution DT 의 객체 식별 기능으로 잔류 형광 입자 수를

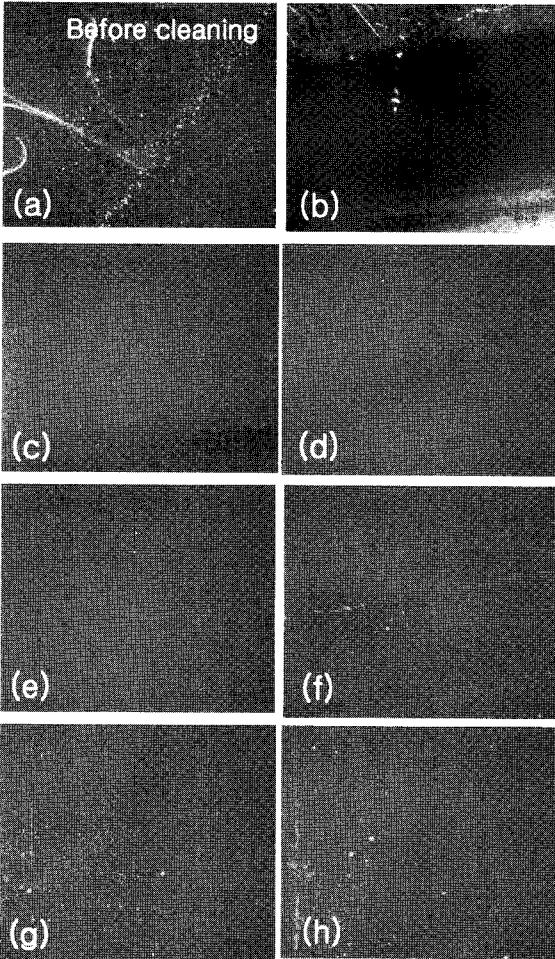


Fig. 6 Fluorescence microscope images after femtosecond laser cleaning with different gap distance (a)before laser cleaning (b)50 μm (c)100 μm (d)150 μm (e)200 μm (f)250 μm (g)300 μm (h)400 μm

비교하였다. 이때 형광 입자로 판단되는 개체가 선택되도록 임계치(threshold) 값을 설정하고, 여기에 노이즈가 카운팅 되는 것을 줄이기 위해 면적이 4pixel 보다 작은 데이터는 제외하였다.

동일한 문턱조건을 적용하여 형광 입자를 카운팅한 결과는 Fig. 7 와 같다. Fig. 7(a)는 레이저 충격 파에 의한 입자 제거율을 비교하기 위해 레이저 세정 전의 웨이퍼를 카운팅한 결과이며, (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h)는 갭 간격을 웨이퍼 표면에서부터 레이저 플라즈마 형성 지점인 갭 간격을 50 μm 씩 증가시키면서 실험한 결과이다. 50 μm 에서는 웨이

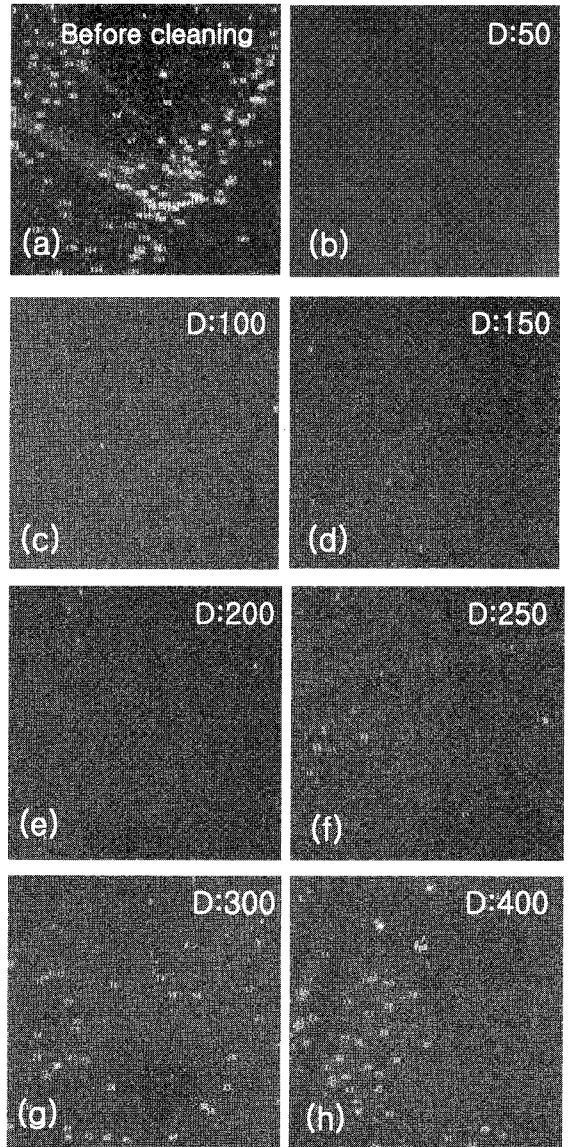


Fig. 7 Image analysis of relative particle count for comparison with different gap distance (a)before laser cleaning, 141count (b)50 μm , 0count (c)100 μm , 4count (d)150 μm , 5count (e)200 μm , 7count (f)250 μm , 17count (g)300 μm , 45count (h)400 μm , 54count

퍼 손상으로 인해 형광 입자가 전혀 관찰되지 않았으나, 100~200 μm 에서 10 개 미만의 입자가 카운팅 되기 시작하였다. 반면 250 μm 부근에서 수가 증가하기 시작하여 300, 400 μm 에서는 세정전과 대

비하여 30%이상의 입자가 잔류하는 것을 확인하였다. 50 μm 와 100 μm 에서 높은 나노입자의 제거율을 보이기는 하였지만 실리콘 웨이퍼에 손상을 주기 때문에(Fig. 5 (a)와 (b)), 최적 조건이라 판단되는 집간격이 150 μm 지점일 때의 세정 결과를 주사전자 현미경(SEM)을 이용하여 Fig. 8 에서 관찰 비교 하였다. Fig. 8 에서의 (a)는 레이저 세정 전을 보여 주며, (b)는 레이저 세정 후 같은 지점을 나타내고 있다. 또한 Fig. 8 의 (b)를 통하여 위의 조건에서 레이저 세정 전후에 실리콘 웨이퍼 표면에 레이저 산란법에 의한 손상 또한 없음을 확인하였다. 또한 국부 영역에서의 펄초 레이저의 플라즈마 충격파(plasma shockwave)에 의한 동일 위치의 세정 전후의 SEM 사진이며 충격파에 따른 손상은 없고 100nm 크기의 형광 입자만이 제거되었음을 확인할 수 있다.

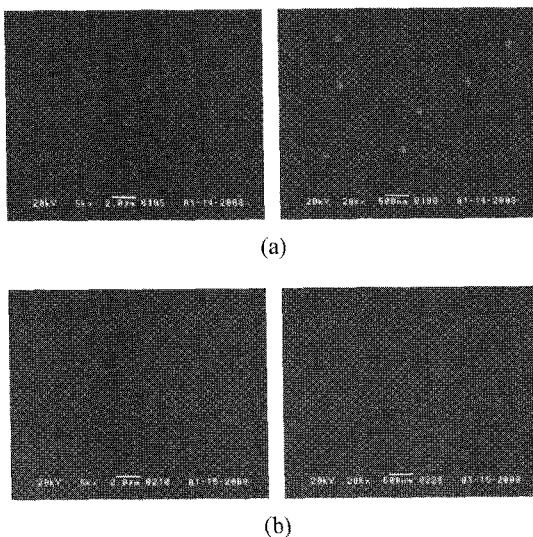


Fig. 8 Image analysis of SEM relative particles (a)before femtosecond laser cleaning (b)after femtosecond laser cleaning

세정 전후에 대한 나노 파티클 카운팅 및 집에 따른 상대적인 카운팅 결과를 Fig. 9 의 그래프에 나타내었다. 본 실험에 사용된 펄초 레이저 세정조건인 경우 웨이퍼에 레이저 빔의 산란에 의한 손상을 주지 않으면서 최적의 세정 효과를 볼 수 있는 영역은 레이저 초점과 실리콘 웨이퍼와의 갭이 150 μm 일 경우로 판단되며 세정 전 대비 최대 97%의 제거율을 나타내었다.

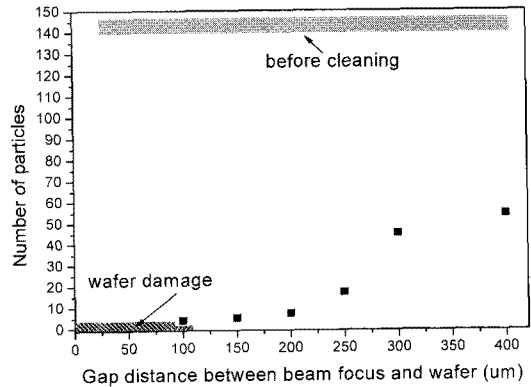


Fig. 9 Removal of PSL nano particles from the surface of silicon wafer as a function of gap distance and particle counting. [Power: 1.15W, Velocity: 0.5mm/s, Objective: 20x(NA 0.42)]

4. 결론

본 연구는 펄초 레이저의 플라즈마 충격파(plasma shockwave)를 이용하여 펄초 레이저의 웨이퍼 건식세정 특성을 확인하기 위하여 웨이퍼에 도포된 100nm 급 형광 입자를 통해 웨이퍼와 펄초 레이저의 초점 거리간의 갭을 제어함으로써 웨이퍼 위에 도포된 100nm 급 형광 입자 제거 실험을 진행하였다. 실리콘 웨이퍼와 펄초 레이저를 수직으로 입사시켜 충격파를 형성시킬 경우 웨이퍼에 심각한 손상이 발생되고 세정 연역 또한 극히 제한적임을 알 수 있었으며, 웨이퍼와 레이저 빔을 평행하게 하여 펄스 반복을 1kHz, 출력 1.15W 의 펄초 레이저를 20x(NA 0.42) 대물렌즈로 집광하고 스캔 속도를 0.5mm/s 로 고정한 후, 시편과 레이저 초점 거리에 따른 입자 제거율을 비교한 결과 갭이 100 μm 이하에서 물리적인 웨이퍼 손상이 발생함을 확인하였으며, 200 μm 이상에서는 세정 전과 대비하여 입자수가 줄어들긴 하였으나 세정 효과는 크지 않았다. 실시한 실험 조건에서 최적의 갭은 150 μm 인 것으로 판단되며, 이미징 프로세싱 방법으로 상대적인 잔류 입자 수를 비교한 결과 세정 전 대비 최대 97% 제거됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 중기거점사업 및 한국과

학재단 국가핵심연구센터 사업(No. R-15-2006-022-01003-0)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. Hoenig, S. A., "Particles on Surfaces," Plenum Press, p. 3, 1998.
2. Walz, J. Y., "Laser Techniques Mark Surfaces Spotless," Photonics Spectra, Issue 6, pp. 116-120, 1997.
3. DeJule, R., "Trends in Wafer Cleaning," Semiconductor International, Issue 8, pp. 64-68, 1998.
4. Tam, A. C., Leung, W. P., Zapka, W. and Ziemlich, W., "Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates," J. Appl. Phys., Vol. 71, No. 7, pp. 3515-3523, 1992.
5. Lu, Y. F., Zheng, Y. W. and Song, W. D., "Laser induced removal of spherical particles from silicon wafers," Appl. Phys., Vol. 87, No. 3, pp. 1534-1539, 2000.
6. Lu, Y. F., Song, W. D., Hong, M. H., Teo, B. S., Chong, T. C. and Low, T. S., "Laser removal of particles from magnetic head sliders," Appl. Phys., Vol. 80, No. 1, pp. 499-504, 1996.
7. Mann, K., Wolff-Rottke, B. and Muller, F., "Cleaning of optical surfaces by excimer laser radiation," Appl. Surf. Sci., Vol. 96-98, pp. 463-468, 1996.
8. Vereecke, G., Röhr, E. and Heyns, M., "Laser-assisted removal of particles on silicon wafers," J. Appl. Phys., Vol. 85, No. 7, pp. 3837-3843, 1999.
9. Halfpenny, D. R. and Kane, D. M., "A quantitative analysis of single pulse ultraviolet dry laser cleaning," J. Appl. Phys., Vol. 86, Vol. 7, pp. 6641-6646, 1999.
10. Lee, J. M. and Watkins, K. G., "Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock waves," J. Appl. Phys., Vol. 89, No. 11, pp. 6496-6500, 2001.
11. Lim, H., Jang, D., Kim, D., Lee, J. W. and Lee, J.-M., "Correlation between particle removal and shock-wave dynamics in the laser shock cleaning process," J. Appl. Phys., Vol. 97, No. 5, pp. 053903(1)-054903(6), 2005
12. Kudryashov, S. I. and Allen, S. D., "Ambient atmosphere effect on dry laser cleaning efficiencies for sub-micron particles on critical surfaces," Conference on Lasers and Electro-Optics, Vol. 3, pp. 1751-1753, 2005.