

펨토초 레이저로 여기 된 플라즈마 충격파를 사용하여 실리콘 웨이퍼에서 나노 입자 제거

전진우¹, 김훈영^{1,2}, 신영관^{1,2}, 최원석^{1,2}, 조성학^{1,2}

1 한국기계연구원 광응용기계연구실

(Department of Laser & Electron Beam Application, Korea Institute of Machinery & Materials)

2 한국과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과

(Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science & Technology (UST))

초록

펨토초 (130fs) Ti: 사파이어 레이저 ($\rho_p = 790 \text{ nm}$)를 통해 여기 된 플라즈마 충격파를 사용하여 실리콘 웨이퍼상의 100 nm 크기 폴리스타렌 라텍스 (PSL) 입자의 세정 효과에 대한 실험이 보고되었다. 플라즈마 충격파가 형성 된 동안 X-Y-Z 스테이지를 사용하여 웨이퍼를 스캔함으로써, 플라즈마 충격파가 발생하기 전과 후에 나노 입자의 제거되는 것을 한 지역에서 관찰하였다. 세정 효율은 플라즈마 형성 점과 표면 사이의 갭 거리에 크게 의존한다. 갭 거리가 150 μm 일 때 나노 입자의 제거 효율은 표면 손상이 없이 95 %에 달했다.

1. 소개

최근에 웨이퍼 표면의 오염 물질을 제거하거나 제어 할 수 있는 기술은 디스플레이, 마이크로 일렉트로닉스 및 반도체 산업에서 점차 중요 해지고 있습니다. 반도체 기술은 반도체가 집적되고 패턴 크기의 축소로 인해 제조 공정 중에 미세오염 물질이 발생하고 이러한 원인으로 인해 고

효율의 세정 기술을 필요로 합니다. 그러나, 불순물 입자의 크기가 작을수록, 표면에 밀착하는 접착력이 커진다. 따라서 작은 입자 인 불순물을 제거하는 것이 더 어렵습니다. 습식 화학 세정, 스크러빙 및 가압 분사 및 초음파 공정의 사용과 같은 종래의 세정기술은 미크론 및 서브 미크론 입자를 제거하는데 비효율적이다. 또한,

습식 세정 공정은 너무 많은 폐수와 불화수소와 같은 오염 물질을 포함하는 용액을 생성합니다. 이들은 일반적으로 반도체 제조 공정 중에 생성되는 유해한 오염 물질을 중화하기 위해 탈 이온수로 희석됩니다. 이러한 이유로 레이저 클리닝과 같은 새로운 드라이 클리닝 기술이 디스플레이, 마이크로일렉트로닉스 및 반도체 산업을

위한 웨이퍼 제조에 사용되는 것을 고려하고 있습니다.

레이저 세척 기술 같은 드라이 클리닝 방법이 고체 표면에서 작은 입자를 효과적으로 제거하기 위한 새로운 접근법으로 연구 및 시연됩니다. 레이저 클리닝은 클리닝 메커니즘을 기반으로 네 가지 카테고리로 나눌 수 있습니다 : 스팀 레이저 클리닝, 열 분리 클리닝, 표면 음파 클리닝 및 플라즈마 충격파 클리닝. 레이저 충격파 세정에 관한 최근의 연구는 레이저 충격파를 사용하는 공정이 고체 표면으로부터 마이크론 및 마이크론 입자를 제거하기 위한 건식 비접촉 방법으로서 효과적이라는 것을 보여주었습니다. 기존의 클리닝 공정에서는 나노초 펄스 레이저를 재료 표면에 집속시켜 플라즈마 충격파를 발생시키고, 이 충격파들이 주변으로 퍼져 나가게 된다. 건식 레이저 세정에 초점을 맞춘 대부분의 기존 연구는 Nd : YAG와 같은 고출력 레이저 및 나노초 단위의 펄스 지속 시간을 갖는 엑시머 레이저를 사용하여 수행되었지만, 제거 효율면에서 레이저 직접 조사에 의한 기판 손상 등과 같은 효과적인 세정 기술을 실현하는 데에 기술적인 문제가 있었습니다. 한편, 극초단, 고강도 레이저 빛과 재료 사

이의 상호 작용은 펨토초 레이저의 장점 때문에 주요 관심사가 되었습니다.

강렬한 레이저 빔이 웨이퍼 표면 바로 위의 공기에 집중되면 공기 주변 구성 요소, 특히 질소와 산소가 파괴되어 이온화되어 강렬한 대기 플라즈마를 생성합니다. 그 후, 플라즈마의 급속팽창에 의해 강한 충격파가 생성되고 구형으로 전파됩니다. 충격파의 힘이 입자와 기판 사이의 접착력보다 크다면, 입자는 분리되어 표면에서 떨어지기 시작합니다. 그러나 공기 중 플라즈마 충격파에 의존하는 레이저 세정 방법은 집속후에 분산 된 빔을 형성하기 때문에 레이저 세정 과정에서 기판의 표면을 손상시킬 수 있습니다. 강렬한 레이저 펄스를 사용하여 레이저 유도 충격파 압력에 대한 수많은 논문이 있다. 그들은 주로 기존 세정의 대안으로 표면 세정을 위한 도구로서 압력의 응용에 초점을 맞추고 있습니다. 이 실험은 선택적으로 레이저를 조사하여 미세 입자를 제거할 수 있는 모델을 제시하였다. 이 모델은 충격파의 압력, 기계적 결합 계수, 펄스 한 발의 강도, 레이저 파장, 펄스 길이 등 다양한 변수들의 관계를 예측 할 수 있게 해준다. 따라서 펨토초 레이저에 의한 표면의 충격파 압력은 나

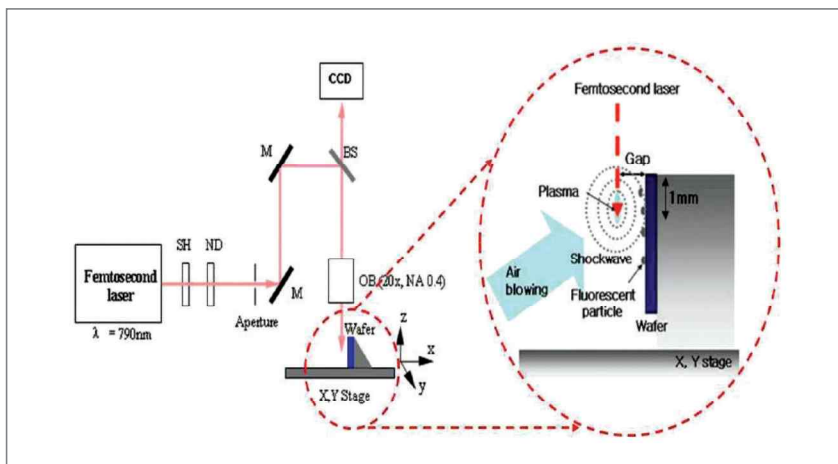
노 세컨드 레이저에 의한 충격파 압력보다 크다. 나노초 레이저 공정은 펨토초 레이저 공정에 비해 낮은 피크파워와 높은 열 효과를 가지고 있습니다. 펨토초 레이저는 재료와 적절한 거리를 통해 재료를 손상시키지 않고 작은 입자들을 제거할 수 있는 압력이 매우 큰 충격파를 만들 수 있습니다. 따라서 펨토초 레이저는 다른 레이저 공정에 비해 깔끔한 처리 방법의 이점을 제공합니다. 이러한 이유로 펨토초 레이저는 나노 초 레이저보다 높은 제거 효율로 선택적인 세정 공정을 제어하기에 유리합니다. 이 결과를 통해, 펨토초 레이저의 조사에 의해 유도 된 플라즈마 충격파 세정은 고효율로 나노 크기의 입자를 표면에서 제거 할 수 있는 유용한 건식 레이저 세정 방법입니다. 이는 반도체 업계에서 선택적으로 영역을 청소하고 높은 제거 효율을 발휘할 수 있는 새롭고 손상을 주지 않는 제거 방법입니다.

본 논문에서는 고강도 펨토초 레이저로 형성된 플라즈마 충격파를 이용하여 실리콘 웨이퍼 표면에서 나노 크기의 형광체 입자를 효과적으로 제거하는 실험 결과를 제시한다. 우리는 실리콘 표면상의 플라즈마 충격파와 나노 입자 사이의 상호 작용으로 인한 나노 입자의 제거 특성을 조사했다.

2. 실험 과정

Fig. 1은 실리콘 웨이퍼 표면에서 나노 입자를 제거하기 위한 펨토초 레이저의 플라즈마 충격파를 사용하는 레이저 클리닝 시스템 개략도이다. 실험에서 드라이 클리닝 공정을 위한 조사 레이저 소스로 사용 된 레이저는 130fs의 펄스 폭을 갖는 Ti : 사파이어 오실레이터 - 증폭기 레이저 시스템 ($\lambda_p = 790 \text{ nm}$)이었고, 1 W의 평균 출력, 1 kHz의 펄스 반복율 및 3.5 mJ의 펄스 에너지를 갖는다. 가우스 프로파일을 갖는 선형 편광 된 레이저 빔은 대물 렌즈 ($\times 20$, NA : 0.4)를 통해 포커싱되었다. 실리콘 웨이퍼 위에 뿌려진 100 nm 크기의 폴리스

Fig 1. 실험도식도



티렌 라텍스 (PSL) 입자를 표준 나노 입자로 사용하여 제거 하였다. 나노 입자의 재오염을 방지하고 세정 효율을 높이기 위해 가스 공급기 (Ar 가스)와 흡입기를 사용 하였다. 이 실험에서 펨토초 레이저의 플라즈마 충격파를 사용하기 전후의 세척 결과가 세척효과를 확인하는 데 사용될 수 있도록 정확한 나노 입자를 허용하는 클린 룸에서 세척 과정을 수행해야 한다는 제한이 있었습니다.

이 실험에 사용 된 PSL 입자는 웨이퍼 세정을 위한 통상적인 오염 테스트에서 사용되는 표준 입자로 잘 알려져 있습니다. 그들은 또한 형광 특성을 가지고 있습니다. 따라서 PSL 입자의 형광 특성으로 인하여 입자의 제거 유무를 관찰 할 수 있습니다. 이 실험에서 실리콘 웨이퍼는 20 mm x 20 mm 크기로 준비하였다. PSL 입자는 PSL 입자가 포함 된 탈 이온수에 웨이퍼를 침지하여 실리콘 웨이퍼 위에 증착되었습니다. PSL 입자를 가진 실리콘 웨이퍼는 Fig.1과 같이 펨토초 레이저 펄스와 평행하게 50 nm의 공간 분해능을 갖는 X-Y-Z 스테이지 상에 수직으로 로딩되었다. 실리콘 웨이퍼의 표면에서 제거 된 입자는 가스 공급기 및 흡입 기를 사용하여 자동으로 제거되었습니다. 레이저 세정 공정의 광학 이미지와 나노 입자의 제거 이미지는 컴퓨터에 연결된 전하 결합 소자 (CCD) 카메라 (AxioCAM)가 장착 된 광학 형광 마이크로 스코프 (Carl Zeiss Axiovert 200M)를 사용하여 얻어졌다. 플라즈마 충격파 세정공정 후에 남은 나노 입자는 나노 입자 계수기 (iSolution DT, IMT Tech, Korea)를 사용하여 계수 하였다. 컴퓨터 제어 스테이지를 사용하여 플라즈마 초점과 웨이퍼 표면 사이의 갭 거리를 변화시킴으로써, 나노 입자 제거 결과의 변화를 관찰하였다.

3. 결과 및 토의

형광 현미경을 사용하여 펨토초 레이저

조사 전후의 나노 입자제거 결과의 변화를 플라즈마 충격파와 실리콘 웨이퍼 표면 사이의 서로 다른 간격에서 관찰하였습니다. Fig 10에서와 같이 레이저 펄스를 조사하여 플라즈마 충격파를 유도 할 때 실리콘 웨이퍼를 광학 X-Y-Z 스테이지를 사용하여 1.15 W의 레이저 출력으로 0.5 mm / s의

속도로 y 축으로 이동시켜 실리콘 웨이퍼의 동일한 영역에서 다중 상호 작용을 피 하였다.

Fig. 2는 (a) 50 μm, (b) 150 μm의 서로 다른 거리에서 펨토초 레이저를 조사하여 플라즈마 충격파 세정 후 실리콘 웨이퍼상의 나노 입자의 현미경 이미지를 보여준다.

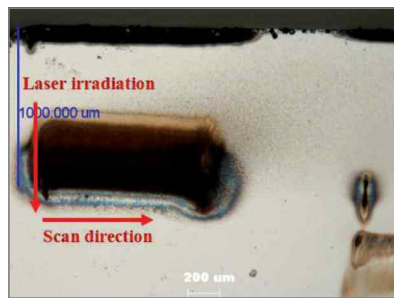


Fig 2a. 실리콘 웨이퍼 표면에 펨토초 레이저 조사 후 현미경 이미지 _ 간격 거리 100 μm

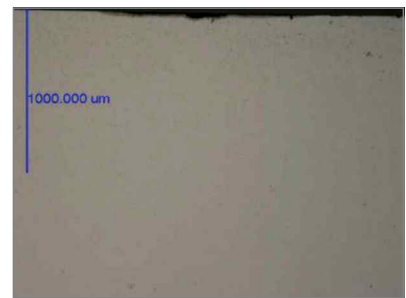


Fig 2b. 실리콘 웨이퍼 표면에 펨토초 레이저 조사 후 현미경 이미지 _ 간격 거리 150 μm

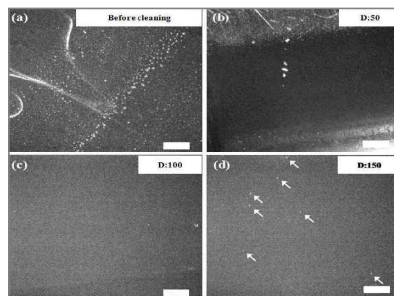


Fig 3a-d. 현광현미경 이미지와 간격 거리 차이에 따른 파티클 개수(a 141개, b 0개, c 4개, d 7개)

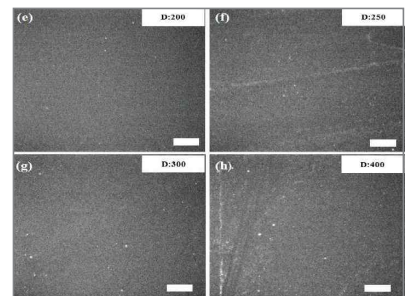


Fig 3e-h. 현광현미경 이미지와 간격 거리 차이에 따른 파티클 개수(e 10개, f 17개, g 45개, h 54개)

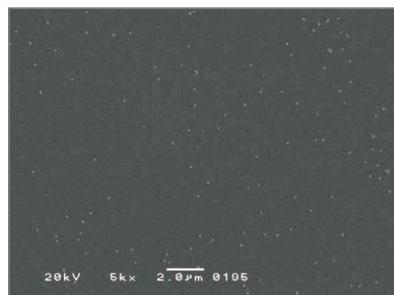


Fig 4a. 펨토초 레이저 조사 전 100 nm 사이즈 파티클의 SEM 이미지

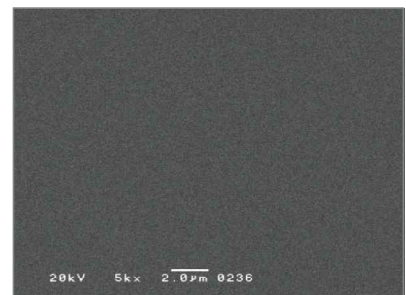


Fig 4b. 펨토초 레이저 조사 후 100 nm 사이즈 파티클의 SEM 이미지

펄스 레이저가 50 μm 의 갭 거리에서 조사 될 때, Fig. 2(a)에서 보듯이, 분산 된 빔에 의한 레이저 어블레이션에 인한 실리콘 웨이퍼 표면의 손상이 관찰되었다. 그러나, 실리콘 표면에 대한 손상은 Fig. 2(b)에서 보듯이 150 μm 이상의 갭 거리에서 발생하지 않았다.

Fig. 3은 플라즈마 충격파 세정 전 실리콘 웨이퍼상의 나노 입자의 현미경 형광 이미지 (Fig. 3(a))와 서로 다른 간격에서 조사한 후의 나노 입자의 현미경 형광 이미지 (Fig. 3 (b) - (h))가 표시됩니다. Figure에서 D는 플라즈마 형성 지점과 실리콘 웨이퍼 표면 사이의 갭 거리를 나타냅니다. 레이저 조사 공전 전에 실리콘 웨이퍼 표면의 나노 크기의 PSL 입자 수는 입자 계수기를 사용하여 141 개로 추정되었습니다. 형광 수치가 낮은 나노 크기의 PSL 입자는 계산되지 않았습니다. 동일한 카운트 조건하에서, 상이한 갭 거리를 갖는 레이저 조사 후에 남아있는 나노 입자가 측정되었다. 펄스 레이저를 갭 거리 50 μm 및 100 μm 로 조사한 결과, 실리콘 웨이퍼 표면의 손상이 관찰되었다. 그러나 실리콘 웨이퍼 표면의 틈새 거리가 150 μm 이상에서는 손상이 관찰되지 않았다. 갭 거리가 150 μm 일 때, Fig. 3(d)에 도시 된 바와 같이, 동일한 정사각형 영역 내에 7 개의 잔류 입자가 존재한다. 따라서, 펄스 레이저를 사용하여 여기 된 플라즈마 충격파를 이용한 제거 효율은 95 %였다.

실리콘 웨이퍼 표면 및 플라즈마 충격파 세정 공정 후에 남은 나노 입자에 대한 손상의 추가 확인을 위해 주사 전자 현미경 (SEM)을 사용하여 더 큰 배율의 이미지를 얻었다. Fig. 4는 150 μm 의 갭 거리에서 플라즈마 충격파를 이용하기 (a) 전과 (b) 후의 동일한 영역에서의 실리콘 웨이퍼 표면상의 PSL 나노 입자의 SEM 이미지를 도시한다. Fig. 4(b)의 SEM 이미지에서 볼 수 있듯이 150 μm 의 거리에서 플라즈마 충격파를 사용하면 실리콘 웨이퍼에 손상이 발

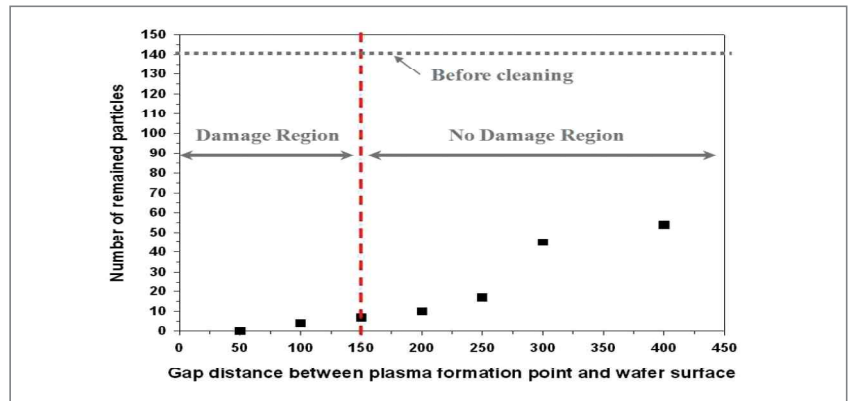


Fig 5. 간격 거리에 따른 파티클 개수

생하지 않는다. 이것은 플라즈마 충격파를 사용하여 명백히 기판 손상없이 실리콘 웨이퍼 표면의 PSL 나노 입자가 제거되었음을 보여줍니다. 갭 거리가 200 μm , 250 μm , 300 μm 및 400 μm 인 경우, Fig. 3(e) ~ (h)에 있어서, 각각 10, 17, 45 및 54 개의 잔류 입자가 존재한다. 따라서, 해당 제거 효율 수준은 92 %, 88 %, 68 % 및 62 %였다.

펄스 레이저의 조사에 따라 플라즈마 충격파 세정 공정과 그 작용하는 방법을 이해하기 위해 플라즈마 초점 포인트와 실리콘 웨이퍼 표면 사이의 간격 변화에 따라 잔류 입자의 수를 측정 하였다. 종합적인 결과는 Fig 5와 같다. 제거 효율은 입자 계수기로 측정 한 동일 면적의 세정 전의 총 입자 수에 대한 플라즈마 충격파 후의 표면에서 제거 된 PSL 입자 수의 백분율로 정의됩니다. 150 μm 의 임계 거리에서 제거 효율의 급격한 증가가 나타났습니다. 이는 펄스 레이저의 조사에 의해 유도 된 플라즈마 충격파 압력이 실리콘 표면으로부터 PSL 입자를 분리하기에 충분히 높다는 것을 의미한다. 동일한 펄스 레이저 조건에서 150 μm 의 간격을 유지하면 입자 제거 효율은 실리콘 웨이퍼 표면에 손상없이 95 %에 도달했다.

반도체 산업에서 사용되는 나노 초 레이저를 사용한 드라이 클리닝 공정의 경우

평균 제거효율은 약 60 % 이하입니다. 이 실험 결과에서 실용화의 관점에서 95 %의 제거 효율은 높으며, 반도체 산업에서의 실용화에 충분하다. 이 공정은 높은 제거 효율로 작은 입자를 선택적으로 제거하기 위한 기존의 세정 기술을 개선할 수 있는 유용한 공정입니다.

4. 결론

우리가 제안한 새로운 클리닝 공정인 고강도의 펄스 레이저로 높은 압력의 충격파를 만들고 발생된 압력에 의해 실리콘 웨이퍼에 있는 미세입자들을 효과적으로 제거할 수 있다는 것을 보여준다. 손상이 없는 나노 입자의 제거는 150 μm 의 갭 간격에서 달성되었다. 펄스 레이저에 의해 여기 된 플라즈마 충격파를 사용하여 수행 된 추가 실험에 따라 실리콘 기판 표면에 손상을 주지 않으면서 실리콘 웨이퍼 표면으로부터 나노 입자를 성공적으로 제거 할 수 있었다. 이 공정은 높은 제거 효율을 가져 작은 입자를 선택적으로 제거하기 위한 종래의 세정 기술의 문제점을 극복 할 수 있는 유용한 기술이다. 이것은 반도체, 디스플레이 및 마이크로 일렉트로닉스 산업에서 사용하기에 적합한 매우 효율적인 세정 방법을 제공합니다.