

실리콘 웨이퍼 표면에서 나노 입자의 거동

Behaviors of nano-scaled particles on silicon wafer surface

[주]아이엠티 레이저그룹 이종명, 김태훈, 조성호
한양대학교 금속재료공학과 강영재, 이상호, 박진구

I. 서론

10 억분의 1m 크기에 해당하는 분자 및 입자를 조작하여 새로운 성질, 특성 및 제품을 얻는 나노 기술(NT) 기술에 있어 효과적인 나노 입자의 생성, 가공 및 생산 기술의 중요성이 날로 커지고 있다. 현재 나노 스케일 입자를 이용한 새로운 반도체 기술과 차세대 디스플레이 기술을 개발에 많은 연구가 진행 중에 있다.

무어의 법칙(Moore's law)에 따라 회로의 집적도는 매우 급속하게 증가하고 있으며, 이를 위해 반도체 회로 선폭의 감소가 꾸준히 진행되고 있다.[1] 현재 반도체 제조 공정에서 0.15~0.12 μm 급 회로 선폭 기술이 널리 사용되고 있으나, 최근 90nm 급 회로 선폭 기술을 이용한 반도체 생산 기술이 국내 반도체 업체에서 최초로 발표 되었다. 이는 반도체 제조에 있어 본격적인 나노 기술 시대(100nm 이하)가 도래함을 의미한다.

나노급 반도체를 양산함에 있어 가장 중요한 인자로 수율(yield)을 들 수 있다. 특히 100nm 이하의 회로 선폭에서 표면에 허용 가능한 오염 입자의 크기는 50nm 이하로 유지하여야 한다.[1,2] 즉 나노 입자들의 효과적인 제거 및 제어가 무엇보다 중요한 이슈로 등장하고 있다.

본 논문에서는 반도체 실리콘 웨이퍼 표면에서 나노 스케일 입자의 특성 및 거동을 기존 마이크로 스케일 입자와 비교하여 살펴 보겠다. 특히 이론적 해석 및 실험을 통해 크기 및 환경에 따른 입자들의 표면 접촉력을 비교해 봄으로써 웨이퍼 표면에서 나노 입자의 특성 및 거동을 살펴 본다.

II. 나노 입자의 접촉력

고체 표면에 존재하는 입자는 표면과 화학적 반응이 발생하지 않는 경우 Fig. 1 와 같이 크게 3 가지 접촉력(adhesion force)이 작동하며, 상기 힘들은 입자에 작용하는

중력(gravitational force)을 무시할 정도로 매우 강하여 표면에 입자를 고착 시킨다.[3,4] 모세관력(capillary force)은 습한 환경 혹은 표면에 얇은 액체막이 형성되어 있는 경우에 크게 작용하며, 접촉 전위차 및 쿨롱 인력(Coulombic attraction)에 의해 발생하는 정전기력(electrostatic force)은 입자 지름이 약 $50\mu\text{m}$ 이상 혹은 액상 내 고체 표면에서 지배적으로 작용하는 힘이다. 표면에 지름이 $50\mu\text{m}$ 이하의 미소 견식 입자가 존재할 때는 반데르발스력(Van der Waals force)이 지배적인 접촉력으로 작동하게 된다. 따라서 견식 환경에서 실리콘 웨이퍼 표면에 나노 크기의 입자가 존재할 경우, 입자의 접촉력은 반데르발스력과 주위 습도에 따른 모세관력에 의해 좌우된다고 할 수 있다.

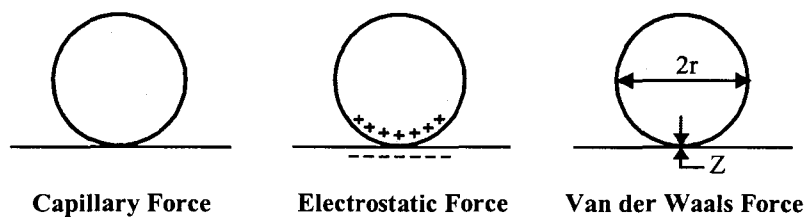


Fig. 1. Adhesion forces for particles on a solid surface

Fig. 2 는 실리콘 웨이퍼 표면에 존재하는 입자의 종류 및 크기에 따른 반데르발스력의 변화를 이론적으로 계산한 것이다. Fig. 2 (a)에서 보이는 바와 같이 입자의 크기가 증가할수록 반데르발스력의 절대값은 증가하게 된다. 입자의 단위 면적당 반데르발스력 즉 접촉압력(adhesion pressure)을 입자의 크기에 따라 표면하면 Fig. 2 (b)와 같다. 그림에서 보이는 바와 같이 입자 크기가 작아 짐에 따라 접촉 압력이 급격히 증가 함을 알 수 있으며 $0.01\mu\text{m}$ ($=10\text{nm}$) 크기의 경우, 10^7Pa 이상의 매우 큰 압력이 입자에 작용함을 알 수 있다. 즉 입자 크기가 마이크로 스케일에서 나노 스케일로 작아짐에 따라 입자가 받은 압력은 매우 크게 증가하며, 따라서 나노 입자의 경우 표면에서 제거가 매우 어려움을 알 수 있다.

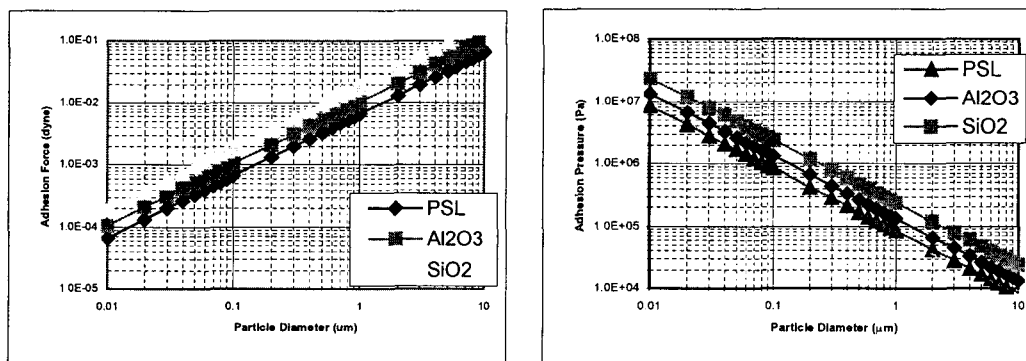


Fig. 2. Van der Waals force (a) and its adhesion pressure (b) as a function of particle diameter

Fig. 3 는 실리콘 웨이퍼 표면에 존재하는 입자의 크기에 따른 모세관력의 변화를 이론적으로 계산한 것이다. Fig. 3 (a)에서 보이는 바와 같이 입자의 크기가 증가할수록 모세관력의 절대값은 증가하게 된다. 그러나 입자의 단위 면적당 모세관력 즉 접촉압력(adhesion pressure)은 입자의 크기가 감소함에 따라 급격히 증가 함을 알 수 있으며, 매질이 초순수(DI water)이며 $0.01\mu\text{m}$ ($=10\text{nm}$) 크기의 입자 경우, $5 \times 10^7 \text{Pa}$ 이상의 매우 큰 압력이 입자에 작용함을 알 수 있다. 즉 입자 크기가 마이크로 스케일에서 나노 스케일로 작아짐에 따라 모세관력에 의해 입자가 받은 압력은 매우 크게 증가하며, 이 값은 반데르발스 압력 보다 약 2~4 배 정도 크게 나타난다.

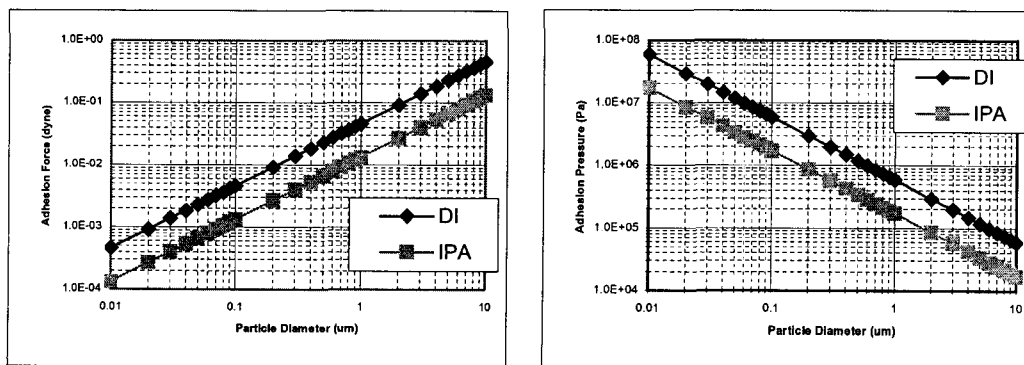


Fig. 3. Capillary force (a) and its adhesion pressure (b) as a function of particle diameter

상기 이론적 계산 분석을 통해 입자의 크기가 작아 짐에 따라, 그리고 접촉 부위 주변의 습도가 증가함에 따라 입자의 접촉 압력은 매우 크게 증가하며, 따라서 나노 스케일 입자의 경우 표면에서 제거가 매우 어려움을 알 수 있다.

III. 실험 및 결과

실리콘 웨이퍼 표면에서 미소 입자의 접촉력에 따른 입자의 거동을 알아 보기 위해 시간에 흐름에 따라 SEM 분석을 하였다. 입자 직경이 $1\mu\text{m}$ 인 구형 표준 입자인 PSL(Polystyrene Latex)을 웨이퍼 표면에 위에 도포한 직후 그리고 30 일이 경과 후 SEM 사진을 촬영하였다. 또한 모세관력의 효과를 알아보기 위해 상대적으로 습도가 높은 곳에 웨이퍼를 보관한 후, 입자의 SEM 촬영 및 비교를 수행하였다.

Fig. 4 는 실리콘 웨이퍼 표면 위의 PSL 입자의 모습을 보여 주고 있다. 입자의 도포 직후 거의 완전한 구형의 PSL 입자를 보여주고 있다. 그러나 약 30 일이 경과 후 입자는 표면과의 계면에서 변형이 발생하였으며, 접촉 면적이 크게 증가하였음을 알 수 있다. 또한 상대 습도가 높은 곳에 보관한 PSL 입자는 완전히 변형되어 입자의 반정도 만이 형태를

들어 내고 있음을 알 수 있다. 이는 습기에 의한 모세관력의 증가 효과에 의한 접촉 압력의 급격한 증가에 의한 것이라 사료된다.

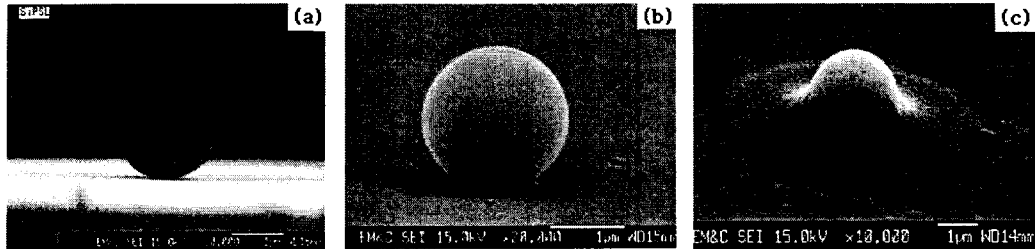


Fig. 4. SEM images of PSL particles on Si wafer surface: (a) as deposited, (b) after 30 days, (c) after 30 days in humid condition

IV. 결론

실리콘 웨이퍼 표면에서 마이크로 스케일 입자에서 나노 스케일 입자까지의 특성 및 거동을 살펴 보기 위해 이론적 분석 및 에이징(aging) 실험을 수행하였다. 이론적 계산 결과 입자의 크기가 작아질수록 입자와 표면간의 접촉 압력이 크게 증가함을 알 수 있었다. 또한 접촉력은 입자의 종류 및 모세관 현상에 의해 크게 변화함을 알 수 있었다. 또한 입자 형상의 SEM 분석을 통해 웨이퍼 표면에 존재하는 미세 PSL 입자는 시간이 지남에 따라 계면에서의 변형이 증가하며, 습한 환경에서 그 변형은 대단히 크게 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 입자의 크기가 매우 작은 나노 스케일 입자의 경우, 매우 큰 반데르발스 및 모세관 압력에 의해 표면에서의 제거가 용이하지 않으며, 시간이 지남에 따라 계면에서 변형량의 증가로 입자 제거가 더욱 더 어려워 짐을 알 수 있다.

VI. 참고 문헌

1. 이종명, 이종명의 반도체 기술 핸드북, 한림원 (2003)
2. ITRS(The International Technology Roadmap for Semiconductors) 2000
3. 이종명, 레이저와 청정가공, 한림원 (2002)
4. K. L. Mittal ed., Particles on Surfaces, Plenum Press (1988)