

CMP 공정에서 나노 연마입자에 의한 박막표면 스크래치 발생 원인 규명에 관한 연구

Investigation of Scratch Mechanism on Thin-Film Surface in CMP using Slurry with Nano-Size Abrasive

*박범영¹, #김형재¹, 김성렬¹, 류호연¹

*Boumyoung Park¹, #Hyoungjae Kim(hyjakim@kitech.re.kr)¹, Sungryul Kim¹, Hoyeun Ryu¹

¹ 한국생산기술연구원 동남권기술실용화본부 융합부품소재센터

Key words : CMP, slurry, silica abrasive, ceria abrasive, friction force, scratch

1. 서론

화학기계연마(CMP; chemical mechanical polishing) 공정은 DRAM, Flash, MPU, ASIC 등과 같은 반도체 칩(chip) 제조에서 절연막 및 금속배선의 평탄화를 위해 적용되는 필수불가결한 기술이다. 특히, STI(shallow trench isolation) CMP 공정은 최소 선폭이 sub-45nm 이하로 감소함에 따라 트랜지스터(transistor)가 형성될 실리콘 기판(silicon wafer) 표면 사이의 갭트렌치(gap-trench)에 증착된 산화막(SiO₂; silicon dioxide)을 평탄화함으로써 산화막 갭필(gap-fill)을 통해 소자들을 전기적으로 절연시키는 핵심공정이다[1].

현재, STI CMP 공정에서 재료를 제거하여 평탄화를 달성하는 가장 중요한 인자는 슬러리(slurry)로 판단되고 있다. 따라서, 디바이스(device) 업체는 STI CMP 공정에서 고평탄화를 위한 슬러리(slurry)를 요구하고 있는 실정이다. 산화막을 평탄화하는 슬러리는 나노 크기의 실리카(SiO₂; silica) 입자를 알칼리(alkaline) 용액에 분산시킨 슬러리가 일반적으로 사용되고 있지만, 칩 제조업체의 요구를 만족시키기 위해 중성의 용액에 세리아(CeO₂; ceria) 입자를 분산시킨 슬러리를 적용함으로써 높은 연마율(RR; removal rate) 및 평탄화 효율(planarization efficiency)을 달성하고 있다. 그러나 세리아 슬러리는 연마불균일도(WIWN; within wafer non-uniformity)와 CMP 후 산화막에 스크래치(scratch)를 발생시키는 몇몇 문제점을 가지고 있다. 세리아 슬러리는 STI CMP 뿐만 아니라 층간절연막(interlayer dielectric) CMP에서도 적용되고 있으며 그 성능과 필요성을 인정받고 있지만, 특히 스크래치와 같은 문제점은 후속공정의 안정화와 칩 수율(yield) 향상을 위해 해결되어야만 하는 과제이다[2].

따라서 CMP 후 발생하는 세리아 슬러리의 스크래치 문제점을 효과적으로 해결하기 위해서는 그 발생 원인을 분석하여야 한다. 본 연구에서는 CMP 공정에서 나노 입자를 포함한 슬러리가 웨이퍼와 패드 사이의 접촉 계면에 개입된 상태에서 패드에 가압된 웨이퍼가 상대운동에 의해 평탄화된다는 점을 감안하여 트라이볼로지(tribology) 측면에서 스크래치 발생 원인을 규명하고자 하였다.

2. 산화막 CMP 실험 및 방법

세리아 슬러리의 스크래치 발생 현상을 효과적으로 분석하기 위하여 일반적으로 산화막 CMP에서 사용되고 있는 실리카 슬러리의 재료제거 결과와 비교하였다. 또한, CMP 중 마찰력을 측정할 수 있는 감시시스템을 Fig. 1과 같이 구성하여 실시간으로 마찰 신호를 획득하여 스크래치 발생과 관련된 실리카 및 세리아 연마입자의 거동을 판단하였다. 실리카 슬러리는 12wt% 입자함량을 가진 알칼리 슬러리를 사용하였고, 세리아 슬러리는 1.95wt%의 입자함량을 가지는 중성 슬러리를 사용하였다. 본 연구에서는 직경 100mm의 열산화막(thermal oxide; 1μm) 웨이퍼를 사용하여 다양한 압력(60-900g/cm²) 및 속도(30-150rpm) 변화에 따른 CMP 실험을 실시하였고, 각 실험마다 마찰신호는 200Hz의 샘플링 주파수로 연마시간 1분 동안 획득하였다. 또한 컨디션닝(conditioning) 유무에 따라 연마율 및 마찰계수를 평가하였다. 그리고 Surfscan, AFM, EDX 장치를 활용하여 스크래치 발생

원인을 효과적으로 분석하고자 하였다.

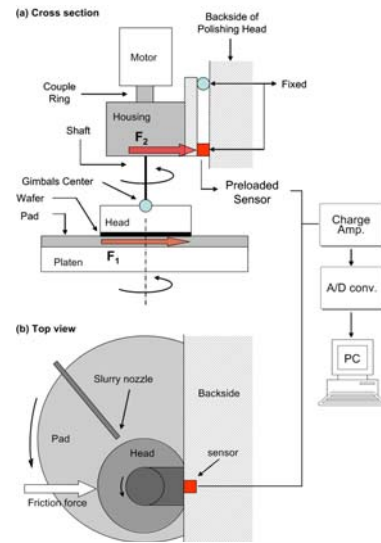


Fig. 1 Schematic of CMP polisher with a force sensor; (a)cross section, and (b)top view

3. 세리아 슬러리의 스크래치 발생 원인 규명

Fig. 2는 2종의 슬러리를 사용하여 산화막 CMP를 실시할 경우 공정 중 웨이퍼 표면에 발생하는 마찰력 신호를 보여준다. 일반적으로 실리카 슬러리의 경우는 연마시간에 따라 마찰력이 감소하지만, 세리아 슬러리는 실리카 슬러리와 비교하여 큰 스틱-슬립(stick-slip) 마찰현상을 보이면서 마찰력이 증가한다. 이러한 스틱-슬립 마찰은 정마찰계수(static COF)가 동마찰계수(kinetic COF)보다 크고 상대속도의 증가에 따라 동마찰계수의 기울기가 음(negative)일 때 발생하며, 본 연구에서 산화막 CMP는 스틱-슬립 마찰 조건을 압력 및 속도 변화에 따라 모두 만족하며, 이는 연마시간에 따라 마찰력 증가 현상과 함께 스크래치 발생을 유발하는 주요 원인으로 작용하는 것으로 판단된다. Fig. 3은 두 슬러리를 사용한 CMP 후 박막 표면을 보여주고 있으며, 특히 세리아 슬러리의 경우는 실리카 슬러리와 비교하여 큰 스크래치에 의한 마이크로 표면지세(micro-topography)를 확인할 수 있다.

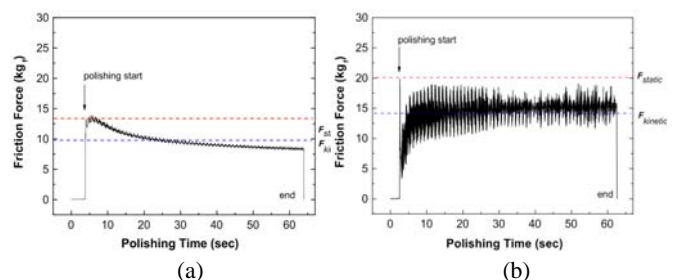


Fig. 2 Example of friction force during polishing time in oxide CMP; (a)silica-based slurry, and (b)ceria-based slurry

이러한 스틱-슬립 마찰현상으로 발생하는 스크래치는 일반적

으로 연마속도를 증가시키므로써 CMP 중 발생하는 평균마찰의 감소시키고 순간적으로 발생하는 스틱-슬립 마찰의 크기를 감소시키므로써 해결할 수 있다. Fig. 4(a)는 실리카 슬러리를 사용한 CMP에서 웨이퍼의 패드에 대한 상대속도를 증가시키므로써 스크래치가 감소되고 있음을 보여주고 있다. 하지만, Fig. 4(b)와 같이 세리아 슬러리를 사용한 산화막 CMP의 경우 상대속도 증가에 따라 스크래치 발생이 감소하지 않는 것을 볼 수 있는데, 이러한 결과는 세리아 입자가 실리카 입자에 비해 비중이 3배 정도 높기 때문에 연마 중 입자가 패드 표면에 쌓이는 현상 때문이다. 또한 세리아 슬러리는 실리카 슬러리의 결과와 비교하여 오히려 스크래치 발생 정도(count)는 적으며, 이는 비중이 높은 나노 크기의 세리아 입자를 분산시키기 위해 폴리아크릴산(PAA; polyacrylid)와 같은 분산제를 슬러리에 첨가함으로써 입자에 의한 박막 표면의 스크래치를 줄여주기 때문이다.

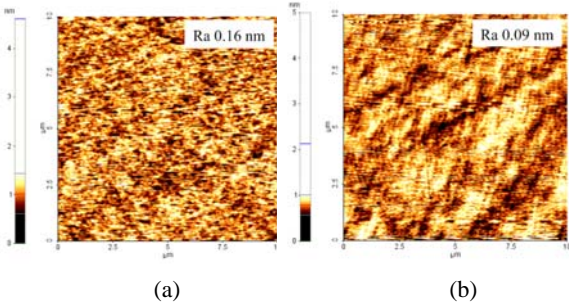


Fig. 3 AFM images showing scratches after oxide CMP; (a)silica-based slurry, and (b)ceria-based slurry

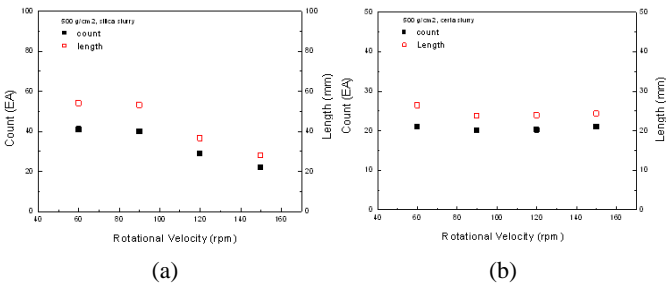


Fig. 4 Scratch Count and length as a function of rotational velocity in oxide CMP; (a)silica-based slurry, and (b)ceria-based slurry

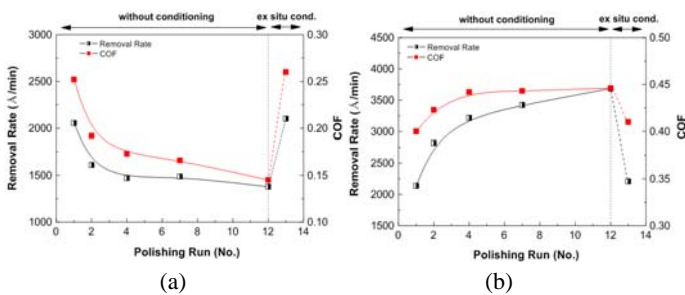


Fig. 5 Removal rate and COF as a function of polishing run without conditioning or with ex situ conditioning; (a)silica-based slurry, and (b)ceria-based slurry

스크래치의 주요 원인이 되는 세리아 입자의 패드 표면 침착 현상을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 패드 컨디셔닝(conditioning) 유무에 따른 연마율 및 마찰계수 결과를 실험을 통하여 얻었다. 실리카 슬러리의 경우 컨디셔닝이 각 웨이퍼의 CMP에 실시되지 않을 경우 연마율과 마찰계수는 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 폴리우레탄(polyurethane) 패드 표면 거칠기(surface roughness)가 웨이퍼의 가압과 상대운동에 의해 감소하고 연마입자를 지역적(local)으로 공급하게 해주는 패드 표면의 마이크로 포어(micro-pore)에 입자와 연마잔류물이 쌓이는 현상 때문이다. 따라서 실리카 입자는 패드와 웨이퍼 사이에서 구속력이 줄어들게 되고 마찰력이 줄어들므로써 연마율을 감소

시키게 된다. 그러나 세리아 슬러리의 경우는 컨디셔닝이 각 CMP공정에 적용되지 않아도 연마율 및 마찰계수가 증가하게 되는데, 이는 입자가 높은 비중으로 인해 컨디셔닝이 없을시 지속적으로 패드 표면에 쌓이게 되고 패드 표면거칠기가 감소한 다하더라도 산화막에 대해 화학적 수화 반응을 일으키는 세리아 입자의 특성(chemical tooth effect) 때문에 마찰계수를 증가시키고 연마율을 증가시키는 것으로 판단된다[3]. 두 슬러리에 대한 연마율 및 마찰계수는 증감현상은 공정간(ex situ) 또는 공정중(in situ) 컨디셔닝 방법에 의해 해결될 수 있다.

Fig. 6은 EDX 스펙트럼(spectra) 분석을 통해 웨이퍼가 접촉하는 패드 위의 영역에서 실리카 및 세리아 입자의 침착(accumulation) 정도를 판단한 결과이다. 실리카 입자의 경우 웨이퍼 중심부를 제거하는 패드 영역과 웨이퍼 가장자리 부분을 제거하는 패드영역에서 입자의 침착이 같음을 볼 수 있다. 하지만 세리아 입자의 경우는 웨이퍼 중심부에 재료제거를 일으키는 패드영역에서 보다 많은 입자가 쌓이는 것으로 판단되며 이는 세리아 입자의 높은 비중 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 세리아 슬러리를 사용하여 산화막 CMP를 실시할 경우 웨이퍼 중심에서 연마율이 높은 현상을 발생시키므로 연마 불균일도를 증가시키게 된다. 또한 연마시간 및 공간적으로 세리아 입자가 패드위에 침착되는 현상은 입자의 미끄럼 운동(sliding motion; two-body abrasion)을 일으킴으로써 산화막에 대한 스크래치를 유발시키는 주요 요인으로 작용하게 된다. 결국, STI CMP 및 산화막 CMP에서 세리아 슬러리의 사용은 향상된 슬러리 분산법 및 지속적인 패드 컨디셔닝 공정 관리를 통해 해결되어야 한다.

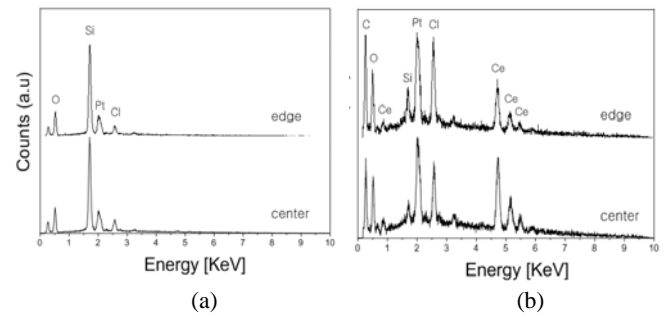


Fig. 6 EDX spectra showing abrasive concentration according to contact area between wafer and pad after 1min polishing; (a)silica-based slurry, and (b)ceria-based slurry

4. 결론

실리카 및 세리아 슬러리는 CMP 공정에서 산화막 웨이퍼에 스크래치를 발생시킨다. 스크래치의 정도는 스틱-슬립 마찰과 압력 속도에 의한 패드와 웨이퍼의 접촉 조건 변화에 따른 입자의 마멸거동에 영향을 받는 것으로 판단된다. 특히, 세리아 입자가 패드표면에 쌓이는 현상은 스크래치를 발생시키는 가장 중요한 원인이며, 효과적인 컨디셔닝 적용 및 안정된 슬러리 개발을 통해 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Kang, M.C., Ki, J.J. and Moon, D.K., "Effect of Organic Additives on Ceria Slurry in Shallow Trench Isolation Chemical Mechanical Planarization," Japanese Journal of Applied Physics, 44(8), 5949-5952, 2005.
2. Cummings, J.E., Smalley, M.D., Papa Rao, S.S. and Canaperi, D.E., "A Comparative Study of Ceria-Based and Silica-Based Slurries for 32 nm Shallow Trench Isolation Chemical Mechanical Planarization," in: Proc. 13th CMP-MIC, Fremont, 4-6 March, 40-47, 2008.
3. Lee, C., "Chemical Processes in Glass Polishing," Journal of Non-Crystalline Solids, 120, 152-171, 1990.