

마찰력 측정을 통한 CMP 공정의 모니터링

정해도*(부산대 기계공학부), 박범영**, 이현섭**, 김형재**, 서현덕**(부산대 대학원 정밀기계공학과)

CMP Process Monitoring through Friction Force Measurement

Haedo Jeong*(School of Mech. Eng., PNU), Boumyoung Park**, Hyunseop Lee**, Hyoungjae Kim** and Heondeok Seo**(Precision Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

The CMP monitoring system was newly developed by the aid of friction force measurement, resulting from installation of piezoelectric quartz sensor on R&D polisher. The correlation between friction and CMP results was investigated in terms of tribological aspects by using the monitoring system. Various friction signals were monitored and analyzed by the change of experimental conditions such as pressure, velocity, pad and slurry. First of all, the lubrication regimes were classified with Sommerfeld Number through measuring coefficient of friction in ILD CMP. And then, the removal mechanism of abrasives could be understood through the correlation with removal rate and coefficient of friction. Especially, the amount of material removal per unit sliding distance is directly proportional to the friction force. The uniformity of CMP performances was also deteriorated as coefficient of friction increased.

Key Words : chemical mechanical polishing(화학기계연마), monitoring(모니터링), tribology(트라이볼로지), friction force(마찰력), coefficient of friction(마찰계수), pad(패드), slurry(슬러리)

1. 서론

화학기계연마(chemical mechanical polishing: CMP) 공정은 웨이퍼의 제조에서부터 소자 및 배선 형성 공정에 걸쳐 매우 광범위하게 적용되고 있다. 웨이퍼의 제조 공정에서는 CMP를 통하여 전 공정에 발생한 표면 하부 결함을 없애고 표면 거칠기와 평탄도를 향상시키며, 웨이퍼 표면에 형성되는 나노토포그래피(nano-topography)를 최소화 시켜 후속되는 공정의 신뢰성을 높여준다. 특히, 나노 토포그래피의 감소는 소자형성 공정에서 소자분리(trench isolation)의 신뢰성을 높여준다.

소자 분리층에서 CMP의 역할은 최소 선폭이 감소할 수록 핵심적인 기술로 인식되고 있다. 회로의 집적도가 증가할 수록 트레치(trech)를 이용한 소자 분리 기술(shallow or deep trench isolation)이 필수적인 기술이 되고 있으며, 이러한 요구를 기술적으로 실현시키기 위해서는 매우 정교한 CMP 공정의 적용이 필요하게 된다.

이러한 웨이퍼 제조, 소자 분리, 배선 공정의 일

련의 과정 중에서 가장 많은 적용 범위 및 적용 횟수를 가지고 있는 공정은 배선 공정으로서 CMP 기술을 반도체 공정에 도입하게 되는 근본적인 요구가 바로 다층 배선 공정(multilevel metalization)에서부터 시작되었다. 반도체 공정은 입자에 의한 오염을 극도로 피하려 하는 본질적 특성을 가지고 있으나 CMP 공정은 반도체 공정에서 가장 두려워하는 입자를 오히려 적극적으로 응용하는 기술이다. 이러한 CMP 공정을 적용할 수 밖에 없었던 이유는 CMP 공정에서 얻어지는 평탄화 특성이 다른 기타 물리적 및 화학적 방법(e.g. SOG, reflow, etch back)에서는 구현하기 힘든 매우 광범위한 영역에서의 평탄화가 가능하기 때문이다. 또한 낮은 저항을 가지는 구리 배선과 기생용량이 작은 저유전율 재료를 이용하여 배선을 형성하는 기술(Cu damascene)은 다른 대체적인 방법으로는 구현하기 힘들기 때문에 CMP가 필수적인 공정으로 인식되고 있다. 그러나 CMP 공정 기술은 수많은 인자가 동시에 연마 현상에 관여하기 때문에 인자들의 독립적인 영향과 지배 인자들 사이의 상호작용이 복잡하게 작용하여 연마제거율이 결정된

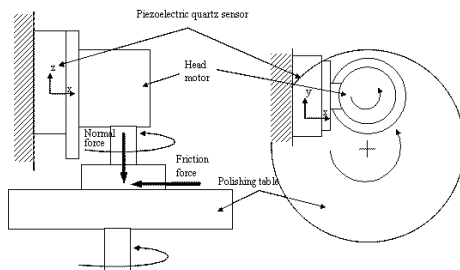
다. 따라서 CMP 공정을 일관적으로 파악을 힘들게 하고 있으며, 근본적인 연마현상에 대한 연구해야할 과제를 남겨두고 있다¹.

그러므로 본 연구에서는 CMP 공정을 마찰(friction), 마멸(wear), 윤활(lubrication)로 대표되는 트라이볼로지(tribology) 관점으로 접근하기 위해 연마 중 마찰력을 실시간으로 측정할 수 있는 모니터링 장치를 개발하여 CMP 현상을 파악하고자 하였다.

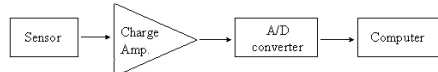
2. 마찰력 측정 장치 개발

2.1 마찰력 측정 장치

CMP 공정 중 발생하는 마찰이 연마 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 CMP 장비(GNP POLI400 polisher)에 가공 중 마찰력을 측정할 수 있는 센서(piezoelectric quartz sensor)를 Fig. 1과 같이 설치하였다. CMP 중 발생하는 마찰력에 의해 가압된 센서는 변위를 일으켜 특정 전압값을 출력하게 되며 이를 증폭·변환 하여 CMP 중 실시간에 걸친 마찰 신호값을 획득하게 된다.



(a) Setup for the measurement of friction force



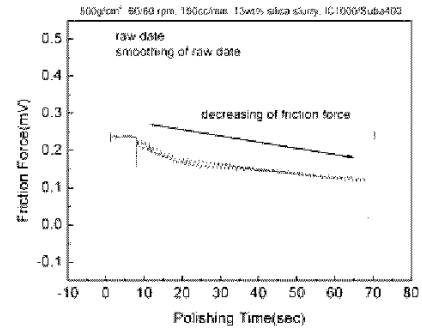
(b) Procedure of attained friction force signals

Fig. 1 CMP monitoring system through friction force measurement

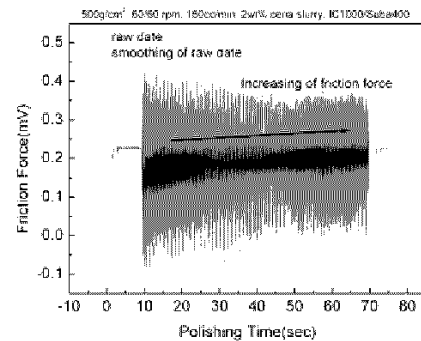
2.2 마찰력 측정

개발된 마찰력 측정 장치를 이용하여 ILD(interlayer dielectric) CMP 공정 중 발생하는 마찰 신호 값을 획득하였다. 실험은 연마 입자로 실리카(SiO₂)와 세리아(CeO₂)를 가지는 슬러리에 대해 실시되었으며 Fig. 2(a), (b)에 나타내었다. 절연막을 형성하는 CMP에서는 일반적으로 실리카 슬러리를 사용하며, Fig. 2(a)와 같이 연마 시간동안 마찰력이 감소하는 현상이 발생하게 된다. 이러한 원인은 폴리우레탄 재질을 가진 패드의 점탄성 변형, 연마 중 패드 상의 표면 거칠기 감소 및 마이크로 포어(pore)의 눈

막힘(glazing) 현상으로 설명될 수 있다. 이러한 결과와 비교하여 소자분리를 위한 STI CMP에 적용되는 세리아 슬러리의 경우, 절연막의 연마에서 Fig. 2(b)와 같이 연마 시간에 대해 마찰력이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이는 세리아 연마입자의 부서짐 현상과 입자의 구름(rolling) 및 미끄럼(sliding) 현상으로 본 논문에서는 3장에서 설명하고자 한다.



(a) Slurry with SiO₂ abrasives



(b) Slurry with CeO₂ abrasives

Fig. 2 Friction force signals as a function of polishing time : (a) Silica slurry, (b) Ceria slurry

3. 모니터링 결과

3.1 ILD CMP에서의 윤활 및 접촉 특성

CMP는 유체가 개입된 상태에서 패드와 웨이퍼의 접촉에 의한 마찰·마멸·윤활 특성을 보임으로 저널 베어링의 Stribeck 선도와 비교하여 CMP시 윤활 및 접촉 특성을 간접적으로 평가하고자 하였다. 마찰계수(coefficient of friction: COF)는 식(1)과 같이 주어진 하중에 대한 측정된 마찰력으로 표현된다.

$$COF = \frac{F_{friction}}{F_{normal}} \quad \text{식(1)}$$

Fig. 3은 Sommerfeld Number($\eta v/p$)에 대한 마찰계수의 관계를 나타내었으며, 대략적인 윤활영역을

표시하였다. 여기서 n , v , p 는 슬러리의 점도, 상대 속도, 연마압력이다. 연마압력이 낮고 연마속도가 빠를수록 마찰계수는 빠르게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 영역은 완전 유체윤활(hydrodynamic lubrication) 영역으로 대체로 층간 배선의 Cu CMP 공정 조건일 때 해당한다. 이 영역은 표면 거칠기에 비해 유막의 두께가 매우 두꺼운 경우로서 두 면사이의 마찰 현상은 유체의 점도와 유막두께에 의존하며 압력에 대한 영향은 작다. 일반적으로 ILD CMP에서 연마압력과 속도 공정 조건이 대략 500g/cm^2 와 0.75m/sec 임을 감안한다면 Sommerfeld Number가 0.038 부근으로 혼합윤활(mixed lubrication) 영역에서 연마가 실시된다는 점을 알 수 있으며, 이때 패드 볼기와 웨이퍼 사이의 직접 접촉이 접촉의 대부분을 차지하고 부분적으로 윤활막의 동압이 발생할 것으로 보여진다².

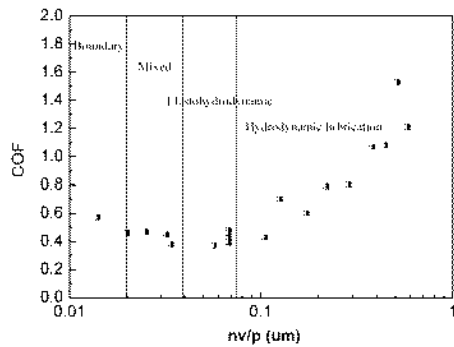


Fig. 3 Coefficient of friction as a function of Sommerfeld Number(nv/p)

3.2 슬러리 입자에 따른 마찰 특성

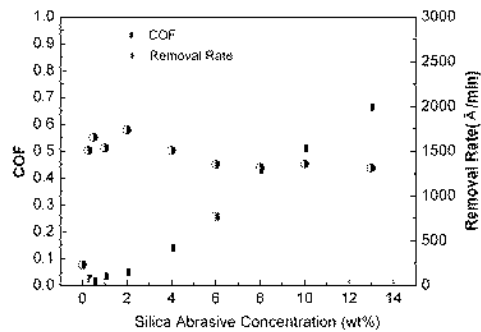
마찰력 측정 장치를 이용하여 연마입자 종류 및 함량(concentration)에 따라 Fig. 4(a), (b)와 같이 마찰 및 마멸 특성을 파악하였다.

실리카 입자는 2wt% 부근에서 최대 마찰계수를 나타내며 입자 함량이 증가하면서 오히려 마찰계수는 감소하여 6-13wt% 구간에서는 마찰계수의 변화는 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이와 동시에 연마제거율은 입자 함량이 증가하면서 증가한다. 실리카 입자와 비교하여 세리아 입자는 입자함량이 증가할수록 마찰계수는 낮은 함량에서 빠르게 증가하다가 대략 2wt% 이후 입자 함량에 따른 큰 변화가 없다. 세리아의 연마제거율은 마찰계수와 유사하게 증가하지만 실리카 입자에 비해 2wt%의 낮은 함량에서 실리카 슬러리 보다 높은 연마제거율을 나타내고 있다. 결과, 입자에 따른 직접적인 연마제거 메커니즘이 다를 것으로 보이며 다음과 같은 연마입자의 재료 제거 거동 가설을 생각할 수 있다.

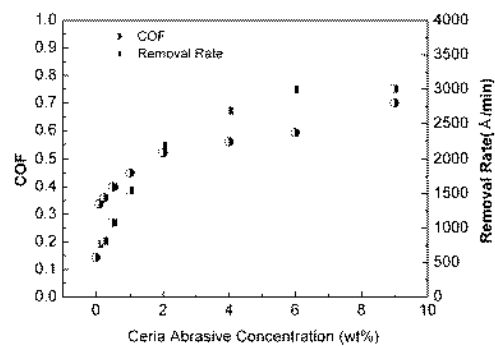
연마입자는 박막을 제거하는 과정에서 미끄럼

(sliding) 운동(2-body abrasion)과 구름(rolling) 운동(3-body abrasion)에 의한 제거 기구를 따르게 된다³. 또한 연마입자가 미끄럼 운동을 한다면 구름운동을 하는 경우 보다 마찰이 클 것이다. 따라서 실리카 입자의 경우 입자 함량이 작을 경우 패드 표면 볼기와 연마입자가 박막에 대해 미끄럼 운동(sliding) 운동을 하게 되며 2wt% 부근을 넘어서면 웨이퍼 전면에 걸친 충분한 연마입자의 공급으로 연마입자가 구름(rolling) 운동을 하는 양이 많아지기 때문에 마찰계수가 감소하여 안정화되는 것이라 보여진다.

또한 세리아 입자의 경우 산화막에 비해 입자 자체의 경도가 낮아 입자가 부서지는 현상을 가정할 수 있다. 더하여 세리아 입자는 물보다 비중이 높아 입자 함량이 증가할수록 미끄럼 운동을 하는 입자의 양이 많아짐으로 마찰계수는 대체적으로 계속 증가하는 현상이 발생하는 것으로 생각된다.



(a) SiO₂ abrasives



(b) CeO₂ abrasives

Fig. 4 Coefficient of friction and removal rate as a function of abrasive concentration

다음으로 Fig. 5는 입자함량에 따른 연마불균일도(WIWN: within wafer non-uniformity)를 나타낸 것이다. Fig. 4를 고려하여 연마제거율과 연마균일도를 확보함을 물론 안정된 마찰 특성을 보이는 입자함량을 선택하면 실리카의 경우 12-14 wt%이며 세리아의 경우는 1.5-2wt%이다. 이 결과는 상용 슬러리의

입자함량에 부합하며 모니터링 장치를 통한 마찰력 측정은 슬러리 개발에 효과적인 도움을 줄 것이라 보여진다.

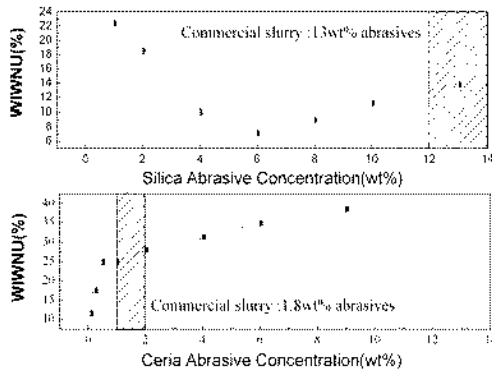


Fig. 5 WIWNU as a function of abrasive concentration (silica and ceria slurry)

3.3 마찰 특성에 의한 연마제거량 및 연마불균일도

CMP 공정에서 마찰력과 연마제거량과의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 연마제거율(dH/dt)은 상대속도에 대한 값이 고정되었을 경우 마찰력에 대해 선형적으로 증가하며, 결국 연마제거율을 상대속도 향으로 나누어서 무차원으로 표시하였을 경우 단위 거리에 대한 연마제거량(dH/ds)은 마찰력에 선형 비례 관계를 이루게 된다.

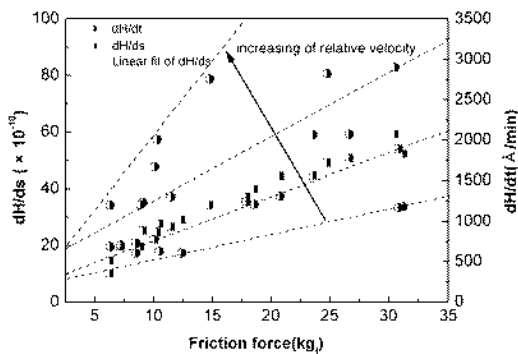


Fig. 6 dH/ds and dH/dt as a function of friction force

또한 Fig. 7과 같이 마찰계수는 연마불균일도에 영향을 준다. 이는 패드와 웨이퍼에 작용하는 수직 응력⁴의 합(resultant force)이 웨이퍼와 패드 사이에 작용하는 마찰력의 장비 헤드부 회전 중심(gimbals center)에 대한 모멘트와 모멘트 평형을 이루기 위해 웨이퍼에 작용하는 지점과 관련되어진다. 즉, 마찰계수가 커질수록 웨이퍼 외주쪽으로 합력의 작용점이 이동하게 되어 웨이퍼 외주 부의 연마제거량을 높임으로써 웨이퍼 전면에 걸친 불균일한 박막제거를 일

으키게 된다.

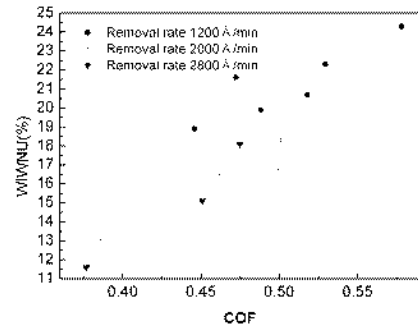


Fig. 7 WIWNU as a function of coefficient of friction

4. 결론

본 연구는 CMP 공정을 트라이볼로지 관점으로 분석하여 연마현상을 파악하게 위해 공정 중 마찰력을 측정할 수 있는 모니터링 장치를 개발하였다. 실험 결과, 저널 베어링의 Stribeck 선도와 비교하여 공정 조건에 따른 CMP에서 윤활 및 접촉 특성을 간접적으로 평가할 수 있었다. 또한 연마입자의 종류와 함량에 따라 마찰 특성이 다르게 나타났으며 입자의 재료제거 메커니즘을 미끄럼 및 구름 운동 관점으로 설명하였다. CMP 공정에 대한 원론적인 접근으로 연마제거와 관계된 마찰 인자의 관계를 모니터링 장치를 활용하여 파악한 결과, 단위 미끄럼 거리에 대한 연마제거량은 마찰력에 비례함을 알 수 있었으며, 연마불균일도는 마찰계수와 밀접한 관계를 보였다.

참고문헌

1. Sikder, A. K., Gigio, F., Wood, J., Kumar, A., and Anthony, M., "Optimization of tribology properties of silicon dioxide during the chemical mechanical planarization process," J. of Electronic Materials, Vol. 30, No. 12, pp. 1520-1526, 2001.
2. Ludema, K. C., "Friction, wear, lubrication," CRC Press, pp. 111-126, 1996.
3. Stachowiak, G. W., "Engineering Tribology," Elsevier, pp. 561-562, 1993.
4. Wang, D., Lee, J., Holland, K., Bibby, T., Beaudoin, S., Cale, T. "Von-mises stress in chemical mechanical polishing process," J. of Electrochemical Society, Vol. 144(4), pp. 1121-1127, 1997.