

CMP 공정에서 발생하는 연마온도 분포에 관한 연구

김형재*, 권대희*, 정해도**, 이응숙***, 신영재***

A Study on the Distribution of Friction Heat generated by CMP Process

Hyoung Jae Kim*, Dae Hee Kwon*, Hae Do Jeong**, Eung Sug Lee***, Young Jae Shin***

ABSTRACT

In this paper, we provide the results of polishing temperature distribution by way of infrared ray measurement system as well as polishing resistance, which can be interpreted as tribological aspects of CMP, using force measurement system. The results include the trend of polishing temperature, its distribution profile and temperature change during polishing. The results indicate that temperature affects greatly to the removal rate. Polishing temperature increases gradually and reaches steady state temperature and the period of temperature change occurs first tens of seconds. Furthermore, the friction force also varies as the same pattern with polishing temperature from high friction to low. These results suggest that the first period of the whole polishing time greatly affects the nonuniformity of removal rate.

Key Words : Chemical Mechanical Polishing (CMP; 화학기계적 연마), Polishing temperature (연마온도), Friction force (마찰력), Tribology (트라이볼로지), pH (수소이온농도), Particle size distribution (입도분포)

1. 서론

화학기계적연마공정(Chemical Mechanical Polishing; CMP)은 슬러리와 연마대상재료의 화학적 조성에 의해 발생하는 화학적 효과와 동시에 슬러리와 패드, 박막사이의 상대운동에서 발생하는 트라이볼로지(Tribology)적인 요소에 의해 박막의 표면에서 원자단위로 재료를 제거해 나가는 공정이다. 이러한 CMP 공정은 200mm 웨이퍼에서 300, 400mm 웨이퍼로 웨이퍼의 크기가 대구경화 되면서 웨이퍼의 면적크기 변화에 의해서 발생하는 슬러리의 유동문제, 단일 연마시간 동안 패드 표면 거칠기의 시간적인 변화, 대면적에 대한 균일한

압력 전달문제 등의 많은 해결해야 할 걸림들이 발생하고 있다. 또한 디바이스의 속도향상과 고집적도라는 두 가지 문제를 해결하기 위하여 최소선폭은 점점 줄어들고 있으며 이에 따른 리소그래피(Lithography)의 요구조건으로 인하여 평탄화의 정도는 더욱 더 엄격해 지고 있는 실정이다. 공정 조건이 엄격해 짐으로 인하여 디바이스 수준(Device level)의 연마 평탄도뿐만 아니라 웨이퍼 전면에서의 연마균일도 또한 수율을 결정하는 매우 중요한 인자임에 틀림없다. 배선 층의 평탄화에서는 패턴들의 밀도나 폭 등에 의해 패턴의 연마차이를 발생시키고 이로 인하여 디싱(Dishing)이나 에로전(Erosion) 등의 배선불량 혹은 절연특

*** 2002년 9월 6일 접수
* 부산대학교 정밀기계공학과
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
*** 한국 기계연구원

성 파괴가 일어나게 된다. 특히 고집적도를 실현하기 위해 사용되는 STI(Shallow Trench Isolation)공정은 소자가 집적되는 층을 직접 연마해야 하기 때문에 더욱 더 엄격한 평탄화 조건이 요구된다. 또한 이들 각각의 칩들이 공간적으로 분포해 있는 웨이퍼 전면에서의 연마율 차이는 결과적으로 칩들 사이의 여러 가지 물리적 혹은 기능적 차이를 가져오게 되어 디바이스 수율에 결정적인 영향을 미치게 된다. 이러한 여러 가지 난제들을 해결하기 위하여 CMP 공정은 수 많은 종류의 정교한 공정 조건들을 개발하고 있으나 아직 연구되어야 할 많은 과제를 안고 있다.

본 연구에서는 박막의 재료 제거 기구에 관여하는 온도의 영향을 파악하기 위한 기본 실험으로서 웨이퍼 전면의 온도 분포를 측정하고 온도발생의 직접적인 원인이 되는 마찰력을 측정하였다. 또한 이러한 공정 중에 발생한 온도가 슬러리의 물성에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 평가하였다.

2. 실험조건

본 실험에서는 CMP 공정중에 발생하는 연마열과 온도발생의 근본 원인이 되는 마찰력을 동시에 측정할 수 있도록 실험장치를 구성하였다(Fig. 1). 이를 위하여 공구동력계(tool dynamometer)를 연마헤드에 직접 부착하여 웨이퍼 면상에 발생하는 마찰력을 직접 측정하였다. 공구동력계는 3 축 방향으로 동시에 힘을 측정할 수 있으며 이를 이용하여 마찰계수(즉, 마찰력을 수직하중으로 나눈 값)를 직접 구해내었다. 이 방식은 토크를 측정하는 간접 방식에 비하여 보다 더 정밀한 측정이 가능하다. 또한 적외선 카메라를 이용하여 패드의 온도를 측정하였으며 측정지점은 웨이퍼와 패드가 접촉이 끝나는 부분의 온도를 측정하였다. 그리고 온도가 슬러리의 물성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 pH의 변화와 입도분포의 변화를 측정하였다.

2.1 연마온도 및 마찰력 측정

Fig. 1에 나타난 것과 같이 적외선 카메라와 공구동력계를 이용하여 마찰력과 패드면상의 온도를 동시에 측정하였다. 이 실험에서 사용된 CMP 장치는 Lapmaster사의 LGP-512를 사용하였으며, 웨이

퍼면에 균일한 압력을 가할 수 있도록 특별히 제작된 공압 헤드를 사용하였다. 이것은 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 웨이퍼 뒷면을 공압을 이용하여 직접 가압하는 방식으로서 이러한 방법을 통하여 중심 축 하중 가압방식에서 발생할 수 있는 압력편차를 줄여 줄 수 있다. 따라서 부분적인 압력 편차에서 발생할 수 있는 온도, 마찰력 등의 측정오차를 보다 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 실험에 사용된 적외선 카메라는 Nikon사의 LIARD-S270 으로서 온도측정 분해능은 최소 0.09℃에서 최대 0.2℃까지이다.

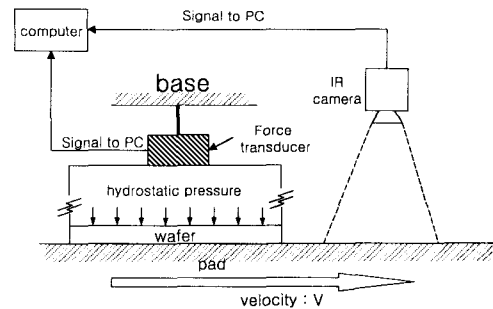


Fig. 1 Experimental setup for measuring the polishing temperature and friction force.

또한 공구동력계는 Kistler사의 9257, 5019B형을 사용하였으며 다른 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental condition for temperature and friction force measurement

Process or consumable	Condition or type
Pad	IC1400(Hard/Soft stacked, Rodel)
Slurry	ILD1300(Rodel)
Pressure	Pneumatic 159, 315, 412g/cm ²
Velocity	10~130rpm(same rpm for head and platen)
Work piece	Si, Thermal Oxide, Glass

실험은 외부 환경에 의한 온도변화의 영향을 최소화 하기 위하여 클린룸에서 실행하였으며 실험과 실험간에 누적되는 열의 영향을 없애기 위하여 연마테이블 하부에 냉각수 순환 시스템(chiller)을 이용하여 25℃의 냉각수를 순환시켰다. 또한

연마 중 패드의 표면상태 변화에 의한 영향을 줄여주기 위하여 모든 실험 시행 전 ABT 사의 8 인치 컨디셔너(conditioner)를 이용하여 30 초간 패드면을 컨디셔닝 하였다.

2.2 연마온도에 따른 슬러리 물성 측정

재료의 제거율에 영향을 미치는 슬러리의 물성은 pH, 1, 2 차 입경 및 평균 입자크기, 분포, 입자함유량, 계면활성제 및 다양한 첨가제의 종류 등 매우 다양하다. 그러나 이것은 슬러리의 제조 과정에서 고려해야 할 인자들이며, 일반적인 CMP 공정에서와 같이 슬러리의 종류가 정해진 경우에는 슬러리 내에서의 입도분포의 변화와 pH의 변화가 연마율에 영향을 미치는 중요한 변수로서 작용한다¹. 따라서 본 실험에서는 온도의 변화에 따른 pH의 변화와 입도분포의 변화를 측정하였다. 입도의 측정은 Malvern사의 Mastersizer를 이용하여 측정하였으며, pH의 측정은 온도값을 보정하면서 그 변화량을 측정하였다. 또한 가열속도에 따른 이들 인자의 변화를 측정하기 위하여 슬러리의 가열속도를 0.8에서 6.9°C/min까지 변화시키면서 실험하였다. 선정된 가열속도는 가열 시스템의 사양과 슬러리의 비열에 의해 제한적이었으나 가능한 실험에서 측정된 실제 연마온도의 변화량(1~8°C/min)에 가깝도록 하였다. 가열장치에서 슬러리 용기의 외벽에서 급격한 온도구배를 방지하기 위하여 슬러리 용기의 외벽을 단열시켜서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상대속도와 압력에 따른 연마온도

연마온도는 슬러리, 패드 그리고 웨이퍼위의 박막간의 상호작용에 의해 생겨나는 결과이다². CMP 공정에서 재료의 연마율은 Fig. 2에 보여지는 바와 같이 연마온도에 강하게 의존한다.

실험에서 측정된 상대속도와 연마압력의 변화에 따른 연마온도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 연마온도는 연마 초기에 일정 기간의 온도 증가구간(transient state)을 보이며 이후 “일시적인” 정상상태의 온도(quasi-steady state temperature)에 도달함을 알 수 있다. 여기서 “일시적”이라는 의미는 연마시간이 누적될수록 패드 표면의 마모에 의해 아주 느린 속

도로 온도가 감소하기 때문에 연마온도가 일정한 상태로 유지되지 않기 때문이다.

이러한 연마 초기의 온도변화는 슬러리의 화학

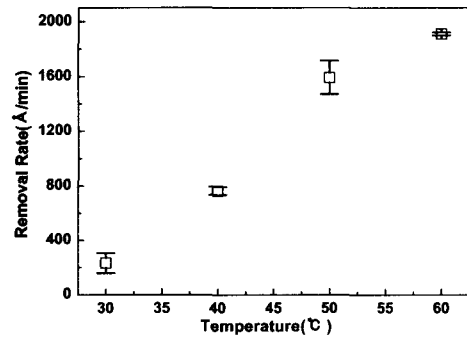
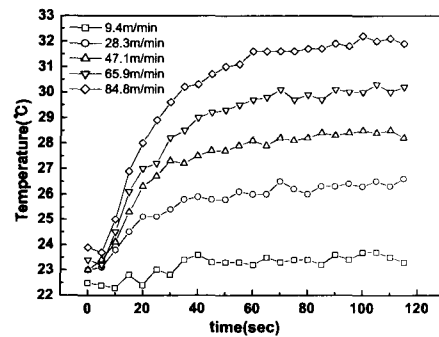
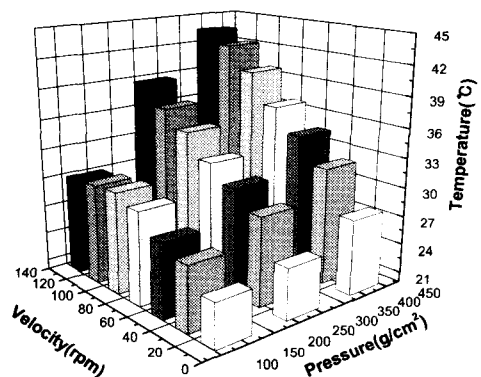


Fig. 2 Removal rate dependency on temperature at fixed pressure and velocity



(a) Temperature change at pressure=300g/cm²



(b) Polishing temperature trend

Fig. 3 Polishing temperature characteristics as a function of process condition

적 상태 및 점도 변화 그리고 패드의 물성치 변화 등을 유발하여 연마율이 시간에 따라 일정하지 않게 만드는 요인이 된다. 더욱이, Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 패드의 공간적인 온도 분포는 웨이퍼가 접촉하는 면에서 큰 편차를 보여줌을 알 수 있다. 이러한 환경에 따른 온도의 편차는 회전형 CMP 장치의 기구학적인 요인에서 기인² 하는 것으로서 결과적으로 웨이퍼가 대구경화 되거나 온도변화에 따른 연마율 변화가 큰 슬러리를 사용하는 경우 웨이퍼 내 연마율에 악영향을 줄 수 있음을 보인다.

Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 정상상태의 온도는 근사적으로 압력과 속도에 대해 선형적인 관계를 보이며 웨이퍼가 접촉할 때 패드에 공급되는 마찰열과 웨이퍼가 접촉하지 않는 기간동안 주변 환경으로 방출하는 에너지 사이의 평형에 의해 그 온도가 결정된다. 따라서 슬러리 및 연마 주변환경의 온도변화는 전체적인 정상상태의 온도값을 변화게 만드는 요인이 된다. 이러한 압력과 속도에 따른 연마온도의 증가는 서로 다른 원인에 의해 일어나는 것으로 보인다. 압력의 증가에서 기인하는 온도상승은 연마하중이 증가하면서 웨이퍼와 패드간의 실 접촉 면적이 증가하게 되고 이에 따라 단위 면적당 발생하는 마찰에너지(dE/dA)가 증가하기 때문으로 생각된다. 반면, 속도의 증가에 의해 연마온도가 증가하는 현상은 패드의 회전수가 증가하기 때문에 패드면에 공급되는 마찰에너지의 주기가 빨라지기 때문으로 생각된다. 즉, 단위시간당 패드면에 공급되는 마찰에너지의 양(dE/dt)이 증가하기 때문에 패드 표면의 온도가 증가하는 것으로 보인다.

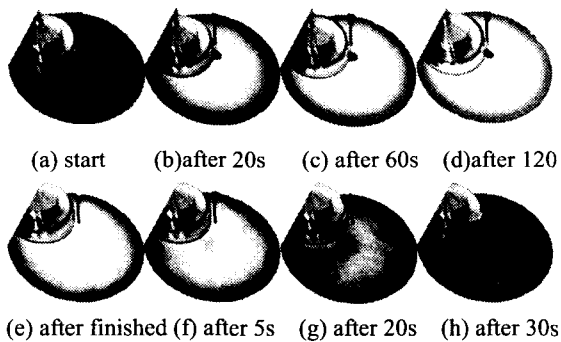
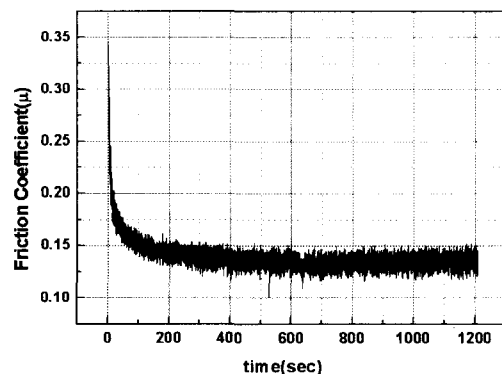


Fig. 4 IR image of whole pad surface, 120sec polishing from (a) to (d) and after finished from (e) to (h), 300g/cm² and 50rpm, thermal oxide

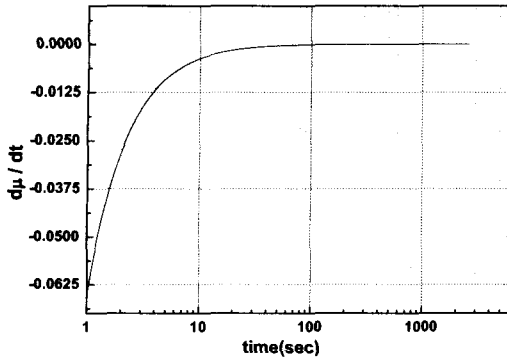
이러한 온도증가의 결과로 인하여 패드 표면의 표면 경도는 감소하며³ 실제 측정된 온도보다 직접 접촉면에서의 온도는 더욱 높을 것으로 예상된다⁴. 따라서 패드 표면돌기(asperity)들의 경도의 감소로 인하여 패드와 웨이퍼 사이의 실 접촉 면적(real contact area)이 증가하며, 연마하중이 일정한 상태이므로 실접촉 압력(real contact pressure)이 감소하게 될 것으로 생각된다. Greenwood 의 이론에 기초한 Yu 의 연구⁵에서 알 수 있는 바와 같이 실 접촉 면적은 실제 연마율에 가장 직접적인 영향을 미치는 기계적 인자 중의 하나이다. 또한 컨디셔닝 없이 연마하는 경우 연마율이 감소하는 가장 근본적인 원인이 패드 돌기들의 마멸에 의한 실 접촉 면적 증가(접촉압력 감소)임⁶ 을 고려할 때 이러한 온도증가에 의한 “실 접촉면적 증가-실 접촉 압력 감소-패드 표면 경도 감소”의 일련의 현상은 연마율을 증가시키는 방향으로 작용 하지는 않을 것으로 생각된다. 오히려 연마율을 감소시키는 작용을 할 것으로 예상된다. 따라서 연마온도 증가에 의한 연마율의 상승은 패드의 기계적인 작용 변화에서 기인하는 것은 아닌 것으로 생각된다.

3.2 연마 중 마찰력 특성

마찰력을 측정된 모든 실험에서 연마초기에는 마찰력이 급격하게 지수적으로 감소하는 것을 측정할 수 있었다. Fig. 5(a)는 컨디셔닝 직후 20 분 동안의 마찰력을 측정된 결과로서, 언급한 바와 같이 초기에 마찰력이 급격하게 감소하는 현상을 보인다.



(a) Friction coefficient change



(b) Derivative of friction coefficient

Fig. 5 Friction coefficient change and its time derivative

이러한 결과는 Fig. 5(a)에 대한 데이터를 마찰력의 시간변화율로 나타낸 결과에서 더욱 명확하게 확인된다(Fig. 5(b)). 초기 마찰력의 변화에 대한 한가지 원인으로 생각되어질 수 있는 것은 컨디셔닝 직후의 패드 표면 거칠기 상태가 연마압력과 상대속도의 영향으로 인하여 변하기 때문으로 생각된다. 이러한 결과는 연마 시간 중간에 여러 개의 패드 샘플에 대한 표면거칠기 측정결과에서 확인된다(Fig. 6). Fig. 6 은 시간에 따른 패드 표면의 거칠기에 대한 측정결과로서 R_{pk} 의 값이 시간이 경과함에 따라 감소함을 알 수 있다.

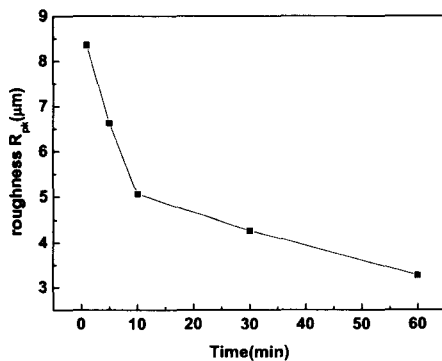


Fig. 6 Pad surface roughness degradation with polishing time

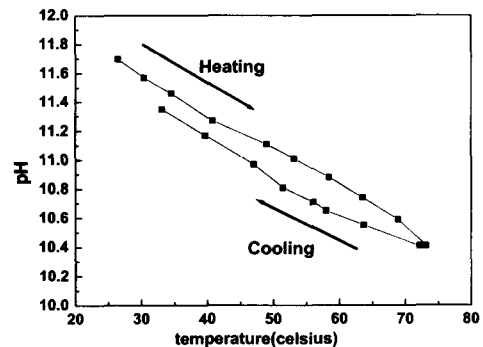
재료의 연마율은 접촉 경계면에서의 전단력의 결과인 마찰력에 크게 의존하기 때문에 이와 같은 초기 마찰력의 변화로 인하여 연마 초기에 연마율이 변화할 것이라는 것을 예상할 수 있다. 이러한

마찰력의 변화율은 컨디셔닝의 강도가 클수록 그 크기가 커지는 것을 실험 중 관찰할 수 있었으며, 따라서 과도한 컨디셔닝은 초기 연마율의 급격한 변화를 초래할 수 있음을 제시한다.

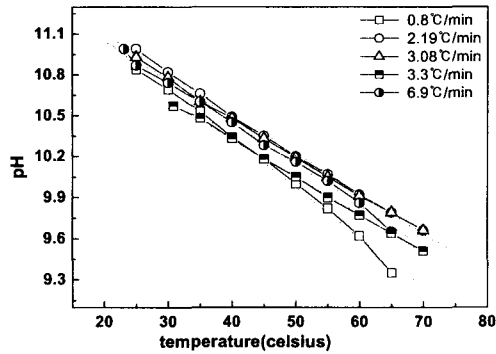
3.3 연마온도에 따른 입도 및 pH 변화

슬러리는 다양한 화학액과 입자의 혼합물이다. 따라서 이들 화학액의 특성으로 인하여 슬러리의 물성은 온도의 변화에 민감하게 바뀐다. 이러한 온도의 변화는 화학적 평형상태의 이동을 가져오게 된다. 즉, 온도의 변화는 pH 변화에 직접적인 영향을 미치게 되어 온도의 변화에 따라 수소이온 농도의 변화를 가져오게 된다. 이러한 결과로 인하여 안정화 상태에 있던 입자의 분산성이 pH의 변화로 인하여 입자 표면의 제타 전위 변화를 유발하여 분산안정성이 영향을 받을 수 있다. 따라서 연마입자의 측면에서 보면 연마온도의 과도한 변화 등으로 인하여 입자의 응집을 유발할 수 있으며 이에 대한 결과로서 연마율의 변화, 거대입자에 의한 스크래치 가능성 증대 등의 결과를 가져올 수 있다. 또한 슬러리의 주성분을 이루고 있는 다양한 화학액들은 온도 변화로 인하여 박막 표면과의 반응성의 변화를 유발할 수 있으며 결과적으로 연마율의 변화에 영향을 줄 수 있다.

본 실험에서는 온도변화에 따른 pH의 변화와 입자 크기 및 분포의 변화를 측정하였다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 온도의 증가와 함께 pH는 감소함을 알 수 있다. 또한 상온으로 온도를 회복 시키는 경우 pH값은 원래의 수치에 가깝게 회복되는 것을 알 수 있다. 그러나 완전히 회복되지는 않는 것을 볼 수 있는데 이것은 실험과정에서 용액의 증발이 원인인 것으로 생각된다.



(a) pH characteristic as heating and cooling



(b) pH characteristic as temperature rising rate

Fig. 7 pH change as temperature and temperature change rate

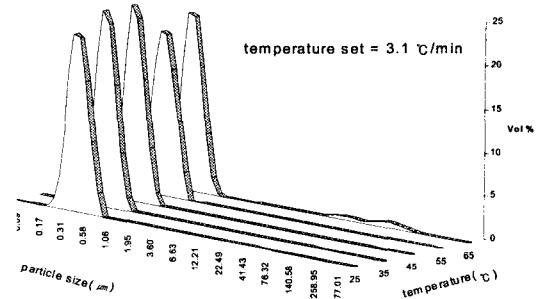
또한 Fig. 7(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 가열 속도는 pH의 변화에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

이러한 온도에 따른 pH의 변화 현상은 슬러리 뿐만 아니라 일반적인 용액에서도 나타나는 현상으로서 온도변화에 따른 이온농도의 평형상태 변화에서 기인한다. 일반적으로 산성용액에서는 온도의 증가에 따라 pH 값이 중성영역에 가깝게 증가하며, 알칼리 용액에서는 반대로 중성에 가깝게 감소하는 것으로 알려져 있다⁷.

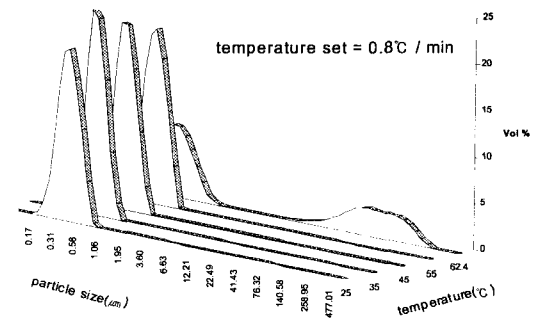
따라서 이러한 온도에 따른 pH의 변화는 결과적으로 $[OH]^-$ 이온 농도의 변화를 가져오게 된다. Tomozawa 와 Cook⁸ 등에 의해 알려진 바와 같이 일반적인 SiO_2 의 연마율은 $[OH]^-$ 이온에 의한 수화(hydration)에 강하게 의존한다. 따라서 $[OH]^-$ 이온 농도의 변화는 연마율의 변화에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 2의 연마율 결과와 Fig. 5, 6에서 보여주는 결과는 상반된 현상을 보인다. 즉, 온도의 증가에 의해 $[OH]^-$ 이온의 양은 감소하고 있는 반면 연마율은 증가하고 있는 것이 보인다. 따라서 이러한 현상은 SiO_2 의 연마율이 pH의 값에만 의존적이지 않음을 보인다.

Gunnarsson⁹ 등과 Iler¹⁰의 연구 결과에 따르면 SiO_2 의 용해도(solubility)는 온도가 증가할수록 증가하며, 이러한 원인은 $[OH]^-$ 이온과 SiO_2 의 Gibb's 반응 에너지(Gibb's energy of reaction) 변화에서 기인하는 것으로 알려져 있다. 따라서 온도 변화에 의해 연마율이 변하는 것은 반응 에너지의 변화로 인한 용해도의 증가 때문인 것으로 생각된다.

따라서 패드 면상의 불균일한 온도 분포는 웨이퍼 내의 연마율 편차(within wafer nonuniformity; WIWNU)를 크게 하는 원인이 된다.



(a) Particle size distribution at 3.1 °C/min



(b) Particle size distribution at 0.8 °C/min

Fig. 8 Particle size distribution as temperature and temperature rising rate

온도와 온도 변화율에 따른 연마입자 크기의 분포특성을 Fig. 8에 나타내었다. 이 실험에서 사용된 가열 속도(온도 변화율)는 3.1 °C/min, 0.8 °C/min이다. 실험결과에서 보여 주듯이 전체 실험에서 슬러리 내의 연마입자는 슬러리의 온도가 50~60°C 이상이 되는 경우 최초의 응집된 입자들이 보이며, 그 이하의 온도에서는 응집된 거대 입자가 보이지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 다른 연구 결과와도 일치한다¹¹. 따라서 일반적인 연마온도는 슬러리 응집온도 이하이므로 온도에 따라 연마율이 변하는 현상에 입자 크기변화가 관여하고 있지는 않은 것으로 생각된다.

높은 온도에서의 입자의 응집은 pH의 변화와 입자들간의 운동에너지 증가에서 한다. 온도 증가로 인하여 연마입자의 운동에너지 증가하기 때문

에 연마 입자들 간의 충돌 확률이 증가하기 때문이다¹². 또한 pH의 변화에 의해 분산된 SiO₂ 입자들의 표면 제타 전위(zeta potential) 변화로 인하여 입자들 상호간의 반발력의 감소로 인하여 입자의 응집을 유발할 수 있다. 따라서 이러한 높은 온도에서의 연마는 박막에 스크래치를 유발할 가능성이 있음을 보여준다.

4. 결론

패드내의 공간적인 온도분포와 시간적인 온도 변화를 측정하였다. 또한 동시에 연마시간에 따른 마찰력의 변화와 시간에 따른 패드 표면거칠기의 변화, 온도와 온도증가율의 영향에 의한 슬러리 물성치 변화 등을 측정하여 이들 인자가 CMP 시 발생하는 재료의 제거에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

패드면의 연마온도는 온도와 압력이 증가할수록 증가하며 이러한 현상은 압력과 속도가 증가할수록 마찰에너지의 공급이 증가하기 때문이다. 또한, 연마시간 내에서 연마온도는 천천히 증가하는 천이영역과 이후 정상상태의 온도로 변화해 감을 확인할 수 있었다. 이러한 압력과 속도에 따른 연마온도의 증가 원인은 서로 다르며, 압력증가에 의한 온도증가는 패드와 웨이퍼 사이의 실 접촉면적 증가에 의한 마찰력 증가에서 기인하나, 속도에 의한 온도 증가는 패드의 회전으로 인해 주기적으로 공급되는 단위시간당 에너지량이 증가하기 때문이다.

실험결과 절연막(PETEOS)의 연마율은 온도의 증가에 따라 증가하는 결과를 보였다. 알칼리 영역의 슬러리의 pH는 온도가 증가함에 따라 감소하는 현상을 보였으며, 전체적인 실험 결과에서 50~60°C이하에서는 뚜렷한 입자의 응집이 발생하지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 온도에 따른 연마율의 증가는 입자의 응집에 의한 연마입자 크기 증대의 기계적 영향이 아님을 알 수 있으며, 오히려 pH의 변화와 반응에너지(Gibb's energy of reaction)의 변화 등 화학적인 영향에 기인하는 것으로 보인다.

마찰계수는 연마의 초기에 급격하게 감소하는 현상을 보이며 따라서 연마초기에 연마율의 변화를 유발한다. 또한 초기의 연마온도변화와 마찰력 변화 등을 동시에 고려할 때 웨이퍼 면상에 공간

적인 연마 불균일을 예측할 수 있다.

후 기

This research has been executed by the National Research Laboratory (NRL) project, sponsored by the Ministry of Science and Technology.

참고문헌

1. AT&T Bell Lab., "CMP mechanism identified at Bell Lab.," *Solid State Technology*, Vol. 37, No. 12, pp. 26, 1994.
2. Hocheng Hong, Huang Yun-Lian and Chen Lai-Juh, "Kinematic Analysis and Measurement of Temperature Rise On a Pad in Chemical Mechanical Planarization," *J. of Electrochem. Soc.*, Vol. 146, No. 11, pp. 4236-4239, 1999.
3. Steigwald, J. M., "Chemical mechanical planarization of microelectronic materials," John Wiley & Sons, NY, pp. 74-83, 1997.
4. Karl-heinz, Zum gahr, *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier, NY, p. 72, 1987.
5. Yu, T. K, Yu, C. C., Orłowski, M., "A Statistical Polishing Pad Model for Chemical Mechanical Polishing," *IEDM 93*, pp. 865-868, 1993.
6. Shan, L., "Evaluation and Characterization of Polyurethan Chemical Mechanical Polishing Pads," Ph. D Thesis, Clarkson Univ. 1998.
7. 弦 佐藤, 亮一本橋, PH를測る, 東京 : 丸善, 1987.
8. Cook, L. M., "Chemical process in glass polishing," *J. of Non-Crystalline Solids*, Vol. 120, pp. 157-161, 1990.
9. Gunnarsson, I., Arnorsson, S., "Amorphous Silica Solubility and the Thermodynamic Properties of H₄SiO₄ in the Range of 0° to 350°C at Psat," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 64, No. 13, pp. 2295-2307, 2000.
10. Iler, R., "The Chemistry of Silica," Wiley, New York, 1979.
11. Fisher, M. L., et. al., "Effect of temperature and shear history on CMP slurry quality and their relation to wafer polish performance," 2001CMP-MIC, 2001,

12. Gun'ko V.M., Zarko V.I., Leboda R., Chibowski E.,
“Aqueous Suspension of Fumed Oxides: Particle size
distribution and zeta potential,” *Advances in Colloid
and Interface Science*, Vol. 91, p. 25, 2001.