Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 17, No. 10, p. 1041, October 2004.

논 문 17-10-4

CMP 결과에 영향을 미치는 마찰 특성에 관한 연구

Characteristics of Friction Affecting CMP Results

박범영[1], 이현섭[1], 김형재[1], 서헌덕[1], 김구연[1], 정해도[2,a]
(Boumyoung Park[1], Hyunseop Lee[1], Hyoungjae Kim[1], Heondeok Seo[1], Gooyoun Kim[1], and Haedo Jeong[2,a])

Abstract

Chemical mechanical polishing(CMP) process was studied in terms of tribology in this paper. CMP performed by the down force and the relative motion of pad and wafer with slurry is typically tribological system composed of friction, wear and lubrication. The piezoelectric quartz sensor for friction force measurement was installed and the friction force was detected during CMP process. Various friction signals were attained and analyzed with the kind of pad, abrasive and abrasive concentration. As a result of experiment, the lubrication regime is classified with ηv/p(η, v and p; the viscosity, relative velocity and pressure). The characteristics of friction and material removal mechanism is also different as a function of the kind of abrasive and the abrasive concentration in slurry. Especially, the material removal per unit distance is directly proportional to the friction force and the non-uniformity has relation to the coefficient of friction.

Key Words : Chemical mechanical polishing, Friction force, Wear, Lubrication, Coefficient of friction, Material removal, Uniformity

1. 서 론

반도체 디바이스는 고집적화 및 고속도화에 따라 재료 측면에서 낮은 비저항을 가지는 배선 재료 및 저유전율의 절연막 재료 선택으로 변화를 지속하고 있다. 또한 디바이스의 구조적 측면에서는 선폭의 최소화, 칩 및 웨이퍼의 대면적화, 다층 배선화와 같은 변화를 이루고 있다. 이러한 변화를 이룰 수 있었던 것은 여러 가지 반도체 제조 공정 중 노광(lithography) 기술과 평탄화(planarization) 기술의 발전에 의해서이다[1].

특히, 평탄화 기술에서 과거 집적도가 낮은 반도체의 제조 공정에서는 레지스트 에치벡(resist etch-back), 리플로우(reflow), SOG(spin on glass)와 같은 국소 평탄화(local planarization) 기술이 적용되었으나, 0.35 ㎛ 이하의 공정에서는 웨이퍼 전면에 걸친 광역 평탄화(global planarization) 방법으로 화학기계연마(CMP: chemical mechanical polishing) 기술이 적용되고 있다[2,3].

화학적 재료 식각(etching)은 일반적으로 등방성을 띄지만, CMP는 패턴의 요철을 이방적으로 제거할 수 있는 특성을 가짐으로써 여러 평탄화 방법에 비하여 비교적 긴 평탄화 길이(planarization length)를 얻을 수 있다. 그림 1과 같이 CMP 슬러리(slurry)는 박막의 화학적 반응에서 에칭에 의한 재료 제거를 피하도록 설계됨으로, 대부분의 박막 재료 제거는 기계적인 마찰과 마멸(wear) 현상에 의해 이루어지게 된다. 따라서 본 연구는 이러한 CMP의 재료 제거 기구를 마찰학(tribology) 관점으로 접근함을 목적으로 하며, 마찰력 측정 장치를 CMP 장비에 설치하여 공정 중 실시간으로 마찰력을 획득하여 연마결과와의 관계를 파악하고자 한다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. 부산대학교 기계공학부
(부산시 금정구 장전2동 산30)
a. Corresponding Author : hdjeong@pusan.ac.kr
접수일자 : 2004. 8. 16
1차 심사 : 2004. 9. 3
심사완료 : 2004. 9. 13

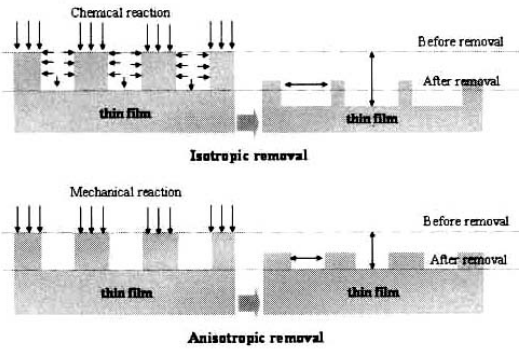


그림 1. 식각의 등방성 및 CMP의 이방성 제거.
Fig. 1. Isotropic removal in etching and anisotropic removal in CMP.

2. CMP 공정

2.1 CMP 메커니즘

CMP 공정은 그 대상재료에 따라 산화막, 텅스텐, 알루미늄, 구리 CMP 등으로 나누어진다. 이러한 CMP 공정의 공통적인 제거 메커니즘은 그림 2와 같이 슬러리 내의 특정 화학 성분이 대상재료와 반응하여 반응층을 생성하며 이를 연마입자에 의한 기계적 가압과 상대 운동으로 제거한다는 것이다.

절연막 재료로 사용되는 산화막(SiO_2)에 대한 ILD (interlayer dielectric) CMP의 경우, 슬러리 내의 pH 조건과 알카리 성분의 수산화기(-OH)에 의해 산화막 자체가 수화(hydration)되어 연마입자에 의한 마찰에 의해 물이 침투하여 연화된 반응층이 제거되어지는 메커니즘을 가진다[4].

배선 재료로 사용되는 금속(Cu, W, Al)에 대한 CMP는 슬러리 내의 산화제(oxidizer)가 재료제거에 중요한 역할을 하게 된다. 산화제는 금속 표면의 전기화학적인 부식(corrosion) 현상을 불러 일으키며, 이와 동시에 부식된 표면은 화학적으로 안정된 부동태층(passivation layer)을 형성하게 된다. 금속 CMP는 이 부동태 층을 제거하게 되는데, ILD CMP와 달리 반응층의 형성을 도와주는 착화제(complexing agent)와 금속 이온의 재흡착(redeposition)을 막고 연마제거율을 향상시키는 킬레이트제(chelating agent)가 슬러리 내에 첨가되어 화학적인 재료 제거를 도와주게 된다[5].

이와 같이 CMP 공정은 연마입자를 사이에 둔 패드와 웨이퍼 사이의 마찰에 의해 대상 재료를 제거하게 된다. 이러한 CMP 메커니즘에 따라 본 연구에서는 CMP 공정을 CMP 트라이보 시스템(tribo-system)으로 바라보고자 한다.

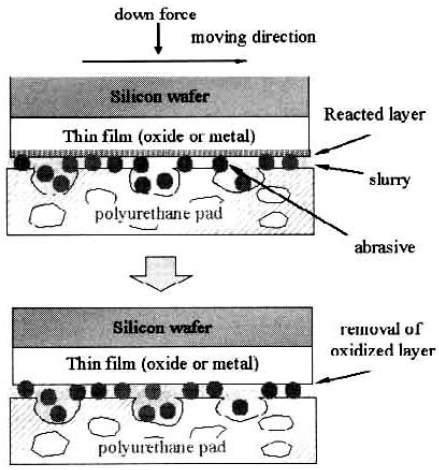


그림 2. CMP 메커니즘.
Fig. 2. CMP mechanism.

2.2 CMP 트라이보 시스템

마찰학은 상대 접촉 운동 중에 서로 상호 작용하는 두 표면과 이에 관련된 물체에 대한 과학·기술이며, 마찰(friction)·마멸·윤활(lubrication)에 관련된 학문이다[6].

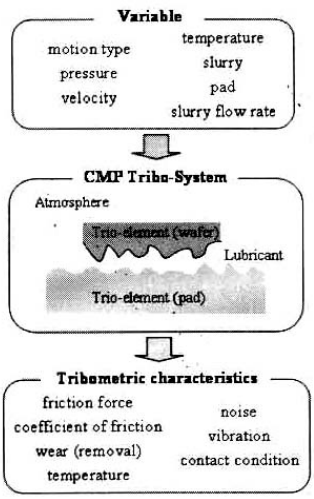


그림 3. CMP 트라이보 시스템.
Fig. 3. CMP tribo-system.

이를 배경으로 CMP 공정은 슬러리(slurry)라는 유체가 개입된 두 개의 표면이 상대속도와 압력을 가지고 운동하는 전형적인 윤활과 마멸을 이용하는 공정이기 때문에 그림 3과 같이 이러한 패드-슬러리-웨이퍼 계(CMP tribo-system)의 상호작용의 결과로서 연마 면에서 발생하는 마찰력과 온도, 표면

의 마멸이 발생하게 된다.

유체가 개입된 상태에서 상대 운동하는 두 면의 접촉 상태는 그림 4에서 볼 수 있는 Stribeck 곡선에 의해 확인할 수 있다[7]. Stribeck 곡선은 유체 베어링에서 유막의 두께와 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로서 마찰계수에 대한 그래프에서 마찰계수 값이 최소값을 향해 변한 이후 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 적어도 하나 이상의 윤활 영역(lubrication regime)이 존재한다는 것을 말하며, 일반적으로 이 값은 표면 거칠기(σ)와 최소 유막 두께(h)에 따라 경계층 윤활(BL: boundary lubrication), 혼합 윤활(mixed lubrication), 탄성 유체 윤활(EHL: elastohydrodynamic lubricaton) 및 완전 유체윤활(HL: hydrodynamic lubrication) 상태로 구분된다.

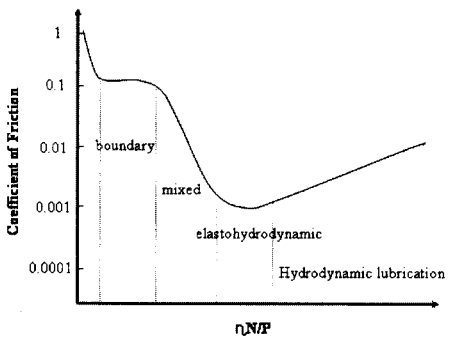


그림 4. Stribeck 선도.

Fig. 4. Stribeck curve(η, N, and P are viscosity, angular velocity and pressure).

경계층 윤활에서는 하중이 크거나 속도와 점도가 낮은 조건에서 대부분 발생하며 두 면의 표면 돌기들이 직접 접촉하고 있거나 단 분자 층 정도의 유체에 의해 분리되어 있다. BL은 정지 상태에서 상대운동을 시작할 때 발생하며 매우 높은 마찰계수값을 가진다. 혼합 윤활 상태는 BL에서 EHL이나 HL 로 전이할 때의 중간 영역으로서 돌기들의 직접 접촉이 접촉의 대부분을 차지하며 부분적으로 윤활막의 동압에 의해 지지되어 있다. 따라서 두 면 사이의 응착(adhesion)이 발생하는 경우 계면에서의 마멸이 증가한다. EHL 영역은 유막에 의해 두면이 완전히 분리되어 있으며, 부가된 하중은 모두 유체의 동압에 의해 지지되어 있다. 그러나 HL에 비하여 유막의 두께가 매우 작기 때문에 돌기들의 탄성 변형이 이루어지고 마멸입자 등이 개입되는 경우 유막의 파괴가 일어나게 된다. HL 영역은 표면 거칠기에 비해 유막의 두께가 매우 두꺼운 경우(h/σ>5)로서 두 면 사이의 마찰 현상은 유체의 점도와 유막 두께에 의존하며 압력에 대한 영향은 작다. 결국 CMP에서는 공정 조건에 따라 이와 같은 윤활 영역 및 접촉 상태에서 실시된다.

3. CMP 공정에서 마찰력 측정

3.1 마찰력 측정 장치

CMP 공정 중 발생하는 마찰이 연마 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 CMP 장비(GNP POLI400)에 가공 중 마찰력을 측정 할 수 있는 센서(piezoelectric quartz sensor)를 그림 5와 같이 설치하였다. CMP 중 발생하는 마찰력에 의해 가압된 센서는 변위를 일으켜 특정 전압값을 출력하게 되며 이를 증폭 · 변환하여 CMP 중 실시간에 걸친 마찰 신호값을 획득하게 된다.

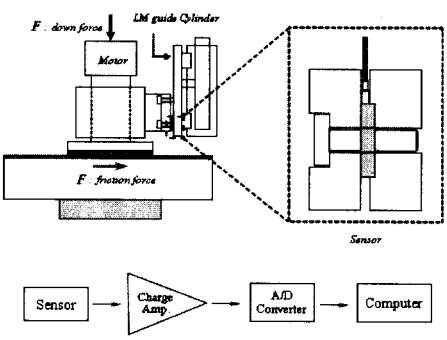


그림 5. 마찰력 측정 장치가 설치된 CMP 장비 개략도.

Fig. 5. Schematic of CMP polisher with the friction force measurement.

3.2 CMP 공정과 마찰 측정

설치된 마찰력 측정 장치를 이용하여 ILD CMP 공정 중 발생하는 마찰 신호 값을 획득하였다. 그림 6과 같이 연마시간 동안 마찰 신호는 연마 초기에 가장 높은 값을 보이면서 시간이 지남에 따라 마찰력은 감소하여 평형 상태에 가까워지고 있다. CMP 공정 초기 마찰 신호값의 큰 감소는 패드의 점탄성 변형에 의한 현상이라 생각되며 이후 계속적인 마찰 감소는 점탄성 변형은 물론 패드의 표면거칠기 감소 및 포어(pore)의 눈막힘 현상(glazing)에 관계하는 것으로 보인다.

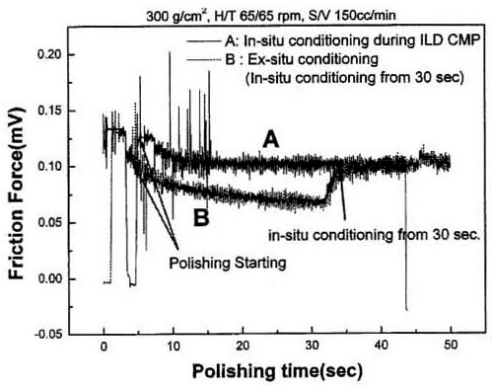


그림 6. 연마시간에 대한 마찰력.

Fig. 6. Friction force as a function of polishing time.

이와 관련하여 그림 7은 CMP 공정에서 사용되는 폴리우레탄(polyurethane) 패드의 점탄성 거동 개념도를 보여 주고 있다. 일반적으로 고분자 재료는 하중이 가해지는 시점에서 순간적인 탄성변형을 보이며, 이후 시간이 지남에 따라 변형이 증가(creep)하는 점탄성 변형 특성을 보이게 된다. 하중이 제거되면 순간적으로 처음 탄성변형한 양만큼 회복하며 서서히 원래 상태로 회복(recovery)하거나 영구변형을 남기게 된다. 즉, 고분자 재료는 스프링(spring)과 댐퍼(damper) 요소를 가지는 구조를 이루고 있다[8]. 결국, CMP는 반도체 디바이스의 연마 중 이러한 가압에 의해 패드의 압축 · 회복이 반복되는 과정을 반복하게 되는 공정이다. 또한 그림 8(a)와 그림 8(b)는 컨디셔닝(conditioning) 후 패드 표면과 CMP 공정 후 패드 표면의 눈막힘 현상을 보여주고 있다. 패드 표면은 슬러리에 포함된 연마입자와 화학액을 원활히 공급하게 해주는 마이크로 포어가 존재하며 연마제거율 확보를 위해 어느 정도의 표면 거칠기를 가진다. 하지만 CMP가 진행됨에 따라 패드 포어가 연마입자와 제거된 재료에 의해 막히게 되는 현상과 표면이 평평해지는 현상이 발생하게 된다[9]. 이러한 패드 표면은 연마제거율과 연마재연성 확보에 악영향을 줌으로 컨디셔닝 공정으로 이를 해결하게 된다.

또한 그림 6에서 공정간(ex-situ)으로 컨디셔닝이 되었을 경우 공정중(in-situ) 컨디셔닝 방법에 비해 마찰신호가 상대적으로 크게 감소함을 볼 수 있다. 하지만 다시 공정중 컨디셔닝이 적용되었을 경우 마찰력 신호가 공정간 컨디셔닝일 때 마찰력 신호값에 도달함을 볼 수 있다. 이러한 공정중 컨디셔닝은 시간에 걸친 웨이퍼 전면에 균일한 연마제거율을 확보해주며 패드 표면의 오염 현상을 방지함으로써 CMP 결과를 향상시킬 수 있다.

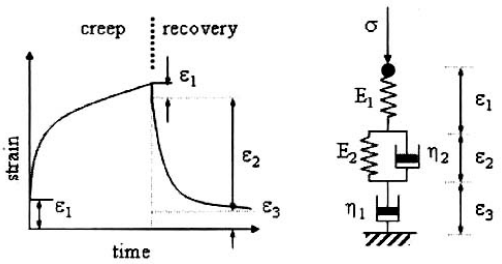
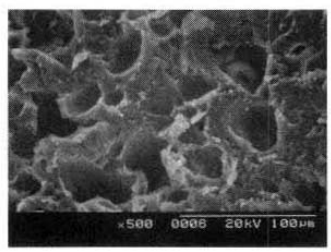
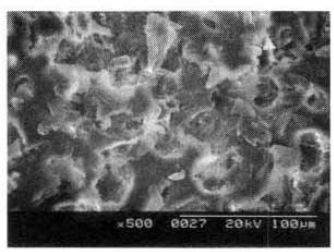


그림 7. 점탄성 재료의 거동과 모델.

Fig. 7. Behavior of viscoelastic material and its 4 element model.



(a)



(b)

그림 8. (a) 컨디셔닝 후 및 (b) CMP후 패드표면.

Fig. 8. The pad surface (a) after conditioning and (b) after CMP.

4. CMP 공정의 마찰 특성

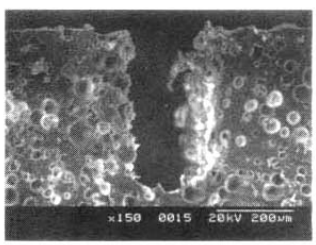
4.1 패드 종류에 따른 마찰 특성

패드의 종류에 따른 경도, 압축률, 재료 등을 표 1에 나타내었다. 일반적으로 CMP에서는 IC1000에 하부층으로 Suba400을 접착한 패드를 사용하고 있

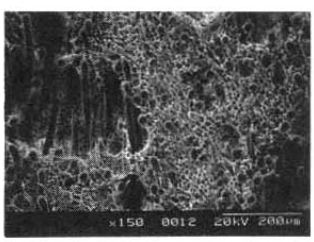
는데, IC1000의 경우는 경질이면서 평탄도(planarity) 향상에 도움을 주며 Suba400은 연질 패드로 웨이퍼 전면에 걸친 연마균일도(uniformity)를 확보하게 해준다. 그림 9(a)는 폴리우레탄의 발포체인 IC1000 패드의 단면 사진이며, 그림 9(b)는 폴리에스테르 펠트(felt)에 폴리머가 코팅된 Suba400 패드의 단면 사진이다.

표 1. CMP 패드 물성.
Table 1. CMP pad property.

	hardness	compressibility	material
IC1000	55 (shore D)	2 %	rigid and microporous polyurethane
Suba400	61 (Asker-C)	8 %	polyurethane impregnated polyester felts
IC1000/ Suba400 stacked	55 (shore D)	4 %	top-pad (IC1000) sub-pad (Suba400)



(a)



(b)

그림 9. (a) IC1000 및 (b) Suba400 패드 단면.
Fig. 9. Pad cross-section of (a) IC1000 and (b) Suba400.

그림 10과 같이 마찰력 측정 장치를 이용하여 패드 종류에 따라 (IC1000/Suba400 stacked, IC1000) 압력(p), 상대속도(v)의 공정 조건을 변화시켜서 윤활영역에 대한 마찰계수(COF: coefficient of friction)를 측정하였다. 슬러리는 ILD1300(fumed silica 13 wt%)을 사용하였으며, 슬러리 공급 유량은 150 cc/min이다. 또한 연마압력을 100~600 g/cm^{2}까지 변화시킴으로써 정마찰계수(static COF)를 측정하여 그 범위를 그림 10에 나타내었다.

IC1000/Suba400 stacked 패드의 경우 IC1000 하부에 연질의 패드 Suba400가 접착되어 있어 패드의 구성 재질, 압축률, 점탄성 거동 등의 물리적 특성이 다르므로 ηv/p의 전 범위에서 IC1000보다 낮은 마찰계수를 보이며 정마찰계수도 작게 나타난다.

그리고 연마압력이 낮고 연마속도가 빠를수록 마찰계수는 빠르게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이 영역은 완전 유체윤활 영역으로 대체로 층간 배선의 Cu CMP 공정조건일 때 해당한다. 일반적으로 ILD CMP에서 연마압력과 속도 공정 조건이 대략 500 g/cm^{2}와 0.75 m/sec임을 감안한다면 ηv/p가 0.038 부근으로 혼합윤활 상태에서 연마가 실시된다는 점을 알 수 있으며, 이때 패드 돌기와 웨이퍼 사이의 직접 접촉이 접촉의 대부분을 차지하고 부분적으로 윤활막의 동압이 발생할 것으로 보여진다.

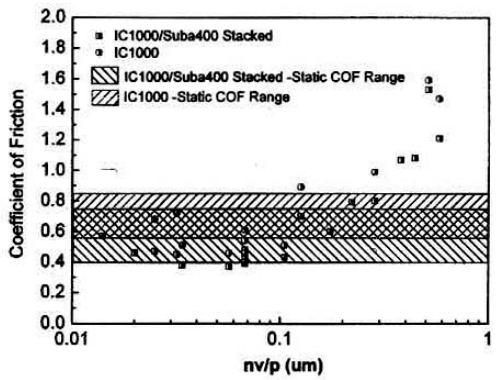


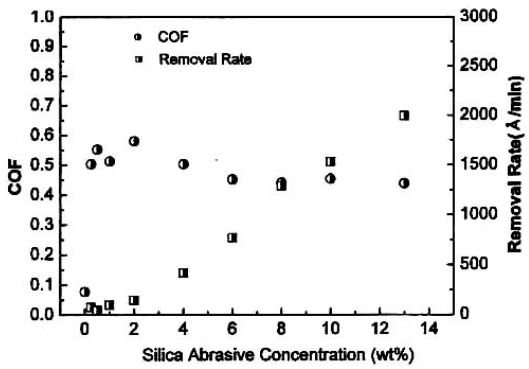
그림 10. ηv/p에 대한 마찰계수.
Fig. 10. Coefficient of friction as a function of ηv/p (η, v and p are the viscosity, relative velocity and pressure).

4.2 슬러리에 따른 마찰 특성

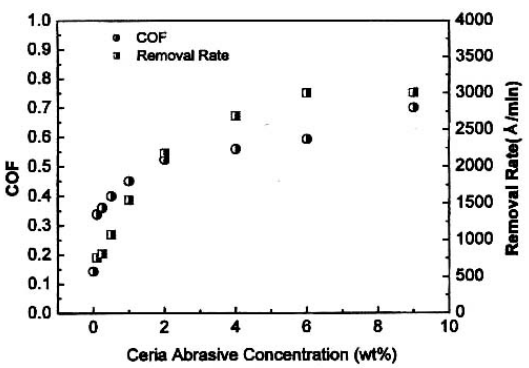
연마입자 종류 및 함량에 따른 마찰 및 마멸 특성을 파악하기 위하여 13 wt% 실리카(silica) 입자를 가지는 ILD1300 슬러리(평균 입경 175 nm)와 9 wt% 세리아(ceria) 슬러리(평균 입경 140 nm)를 희석하여 연마압력 500 g/cm^2, 상대속도 0.75 m/sec의 동일한 조건에서 CMP를 실시하여 그림 11(a), 그림 11(b)와 같은 결과를 얻었다.

실리카 입자는 2 wt% 부근에서 최대 마찰계수를 나타내며 입자 함량이 증가하면서 오히려 마찰계수는 감소하여 6-13 wt% 구간에서는 마찰계수의 변

화는 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이와 동시에 연마제거율은 입자 함량이 증가하면서 증가한다. 실리카 입자와 비교하여 세리아 입자는 입자 함량이 증가할수록 마찰계수는 낮은 함량에서 빠르게 증가하다가 대략 2 wt% 이후 입자 함량에 따른 큰 변화가 없다. 세리아의 연마제거율은 마찰계수와 유사하게 증가하지만 실리카 입자에 비해 2 wt%의 낮은 함량에서 실리카 슬러리 보다 높은 연마제거율을 나타내고 있다. ILD CMP의 경우 실리카 입자를 사용할 경우 13 wt% 부근의 입자 함량의 슬러리를 사용하며, 특히 STI(shallow trench isolation)에 대한 CMP의 경우 1.8 wt% 부근의 입자 함량을 가지는 세리아 슬러리를 사용하게 된다. 결과, 입자에 따라 직접적인 연마제거 메커니즘은 다를 것으로 보여지며, 다음과 같은 연마입자의 재료 제거 거동 가설을 생각할 수 있다.



(a)



(b)

그림 11. 입자함량에 따른 마찰계수와 연마제거율 (a) 실리카 입자 (b) 세리아 입자.

Fig. 11. Coefficient of friction and removal rate as a function of abrasive concentration : (a) silica abrasive (b) ceria abrasive.

연마입자는 박막을 제거하는 과정에서 그림 12와 같이 미끄럼(sliding) 운동(2-body abrasion)과 구름(rolling) 운동(3-body abrasion)에 의한 제거 기구를 따르게 된다[10]. 또한 연마입자가 미끄럼 운동을 한다면 구름운동을 하는 경우 보다 마찰력이 클 것이다. 따라서 실리카 입자의 경우 입자 함량이 작을 경우 패드 표면 돌기와 연마입자가 박막에 대해 미끄럼(sliding) 운동을 하게 되며 2 wt% 부근을 넘어서면 웨이퍼 전면에 걸친 충분한 연마입자의 공급으로 연마입자가 구름(rolling) 운동을 하는 양이 많아지기 때문에 마찰계수가 감소하여 안정화되는 것이라 보여진다.

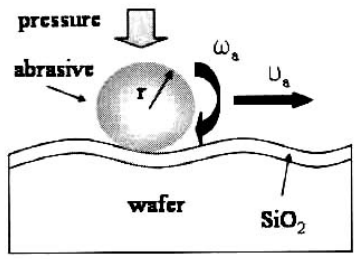


그림 12. 입자의 미끄럼 및 구름 운동.

Fig. 12. Sliding and rolling motion of abrasive.

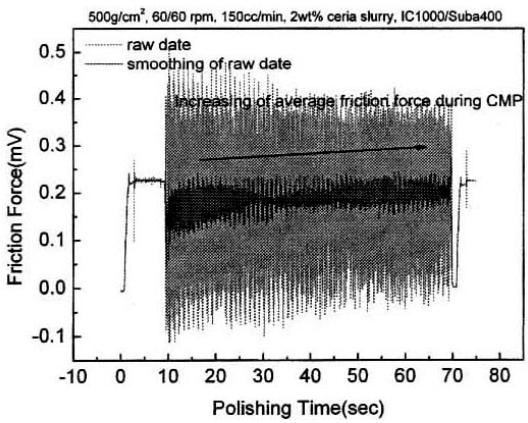


그림 13. 세리아 슬러리의 마찰 특성.

Fig. 13. Friction force characteristic of ceria slurry.

또한 세리아 입자의 경우 산화막(SiO_2)에 비해 입자 자체의 경도가 낮아 연마 중 입자가 부서지는 현상을 가정할 수 있다[11]. 그림 13은 연마시간에

대한 세리아 슬러리의 마찰특성을 나타낸 것이며 그림 6의 실리카 입자와 대조적으로 연마 중 계속적인 마찰력의 증가를 볼 수 있는데 이는 연마입자의 부서짐 현상에 의한 것이라 보여진다. 더하여 세리아 입자는 물보다 비중이 높아 입자 함량이 증가할수록 미끄럼 운동을 하는 입자의 양이 많아짐으로 마찰계수가 대체적으로 계속 증가하는 현상이 발생하는 것으로 생각된다.

4.3 마찰 특성에 따른 CMP 결과

CMP 공정에서 연마제거량은 마찰력에 의한 일, 마찰열에 의한 일, 슬러리 내의 화학성분에 의한 일과 같은 공급되는 에너지와 복사, 전도, 대류, 진동 등에 의해 손실되는 에너지로 구분되어진다. 특히 연마입자가 개입된 상태에서 웨이퍼와 패드 사이의 마찰력은 연마제거량을 확보하는 주된 역할을 하게 되며 이러한 에너지 관점에서 볼 때 ILD CMP 공정에서 박막의 연마제거량과 마찰력은 상관성을 가진다. 그림 14는 마찰력과 연마제거, 즉 마멸과의 관계를 나타내고 있다. 마찰력과 단위 시간에 대한 연마제거량, 즉 연마제거율(dH/dt)은 상관 관계가 없으나 단위 거리에 대한 연마제거량(dH/ds)과는 식(1)과 같이 선형비례 관계를 이루고 있다.

$$\frac{dH}{ds} = A \cdot F_{friction} + B \qquad (1)$$

여기서 H, s, $F_{friction}$은 박막 두께, 상대운동 거리, 마찰력이며, A, B는 상수이다. 결과적으로 박막의 제거량은 식(1)을 상대운동 거리에 대해 적분하면 마찰력에 의한 일과 관계됨을 알 수 있다.

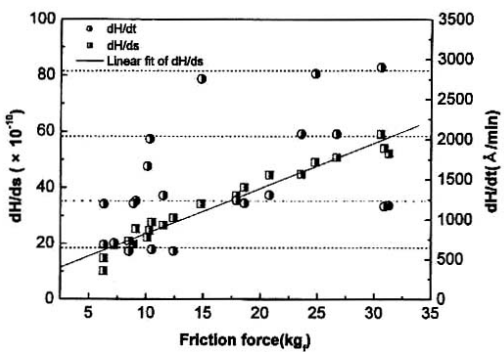


그림 14. 마찰력에 대한 dH/dt 및 dH/ds.

Fig. 14. dH/dt and dH/ds as a function of friction force.

그림 15는 마찰계수(coefficient of friction)와 연마불균일도(WIWNU)의 관계를 나타내고 있다. 연마불균일도는 혼합윤활, 탄성유체윤활, 완전 유체윤활의 3개의 영역에 대한 연마제거율이 대략 600, 1200, 2000, 2800 Å/min인 압력과 속도 조건에서 CMP를 실시하여 계산되어졌다.

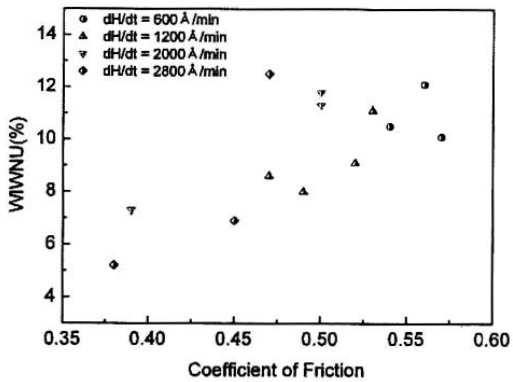


그림 15. 마찰계수에 대한 연마불균일도.

Fig. 15. WIWNU as a function of coefficient of friction.

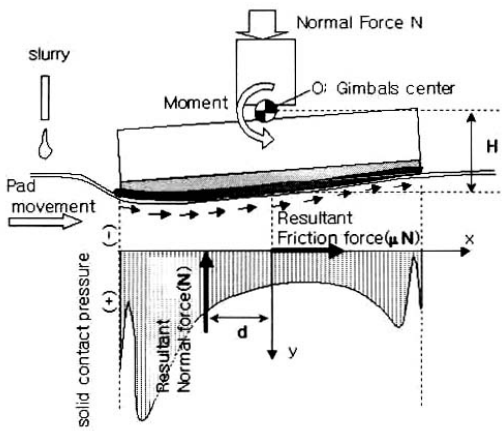


그림 16. 장비 헤드부의 모멘트 평형 개략도.

Fig. 16. Schematic of the moment balance of the head.

대체적으로 마찰계수가 증가할수록 연마불균일도는 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 패드와 웨이퍼에 작용하는 수직 응력의 합력(resultant normal force)이 웨이퍼와 패드 사이에 작용하는 마찰력의 장비 헤드부 회전 중심(gimbals center)에 대한 모멘트(moment)와 모멘트 평형을 이루기 위해 웨이퍼

에 작용하는 지점과 관련되어진다. 즉, 그림 16에서 볼 수 있듯이 수직응력[12]의 합력은 마찰력과 연마헤드의 모멘트 균형을 위해 웨이퍼가 진행하는 방향으로 형성된다. 이 때 모멘트 균형은 식(2)와 같이 계산될 수 있다.

$$\Sigma M_o = 0 \; ; \quad H\mu N - Nd = 0 \tag{2}$$

여기서 M_o, H, μ, N, d는 각각 O점에 대한 모멘트, 헤드부 회전중심과 웨이퍼 사이 거리, 마찰계수, 수직응력의 합력, 합력의 작용점이다. 식(2)에서와 같이 수직응력의 합력 작용점(d)는 마찰계수(μ)와 비례하며 마찰계수가 커질수록 웨이퍼 외주쪽으로 합력의 작용점이 이동하게 되어 웨이퍼 외주 부의 마멸량을 높임으로써 웨이퍼 전면에 걸친 불균일한 박막 제거를 일으키게 된다.

5. 결 론

본 연구는 CMP시 발생하는 마찰력을 실시간으로 측정할 수 있는 장치를 구성하여 ILD CMP 공정을 마찰, 마멸, 윤활로 대표되는 마찰학 관점에서 고찰하였다. 그 결과, 패드의 종류에 따라 구성재료, 압축률, 점탄성 거동 등이 다르므로 ηv/p(η, v, p는 점도, 상대속도, 압력)에 따라 마찰계수의 차이를 확인하였으며, 윤활영역을 구분할 수 있어 Stribeck 선도와 비교하여 웨이퍼와 패드사이의 접촉 상태를 간접적으로 평가하였다. 또한 실리카 입자와 세리아 입자를 가지는 슬러리를 이용하여 입자 함량에 따라 마찰 특성이 다름을 확인하였으며, 연마 입자의 박막 제거는 미끄럼 운동과 구름 운동에 의해 이루어짐을 추정하였다. 마지막으로 CMP시 마찰력 발생과 연마결과와의 관계를 파악한 결과, 단위 거리에 대한 연마제거량은 마찰력에 비례하며 이는 재료제거가 마찰에너지와 관계함을 알 수 있었다. 그리고 연마불균일도는 웨이퍼에 작용하는 수직응력의 합력 작용점과 관계된 마찰계수와 비례한다.

참고 문헌

[1] 김상용, 서용진, 이우선, 이강현, 장의구, "슬러리와 패드 변화에 따른 텅스텐 플러그 CMP 공정의 최적화", 전기전자재료학회 논문지, 13권, 7호, p. 568, 2000.

[2] A. K. Sikder, F. Gigio, J. Wood, A. Kumar, and M. Anthony, "Optimization of tribology properties of silicon dioxide during the chemical mechanical planarization process", J. of Electronic materials, Vol. 30, No. 12, p. 1520, 2001.

[3] 김상용, 서용진, 이우선, 장의구, "실리콘 웨이퍼위에 증착된 실리케이트 산화막의 CMP 슬러리 오염 특성", 전기전자재료학회논문지, 13권, 2호, p. 131, 2000.

[4] M. Tomozawa, "Oxide CMP mechanisms", Solid State Technology, p. 169, 1977.

[5] J. M. Steigerwarld, "Chemical mechanical planarization of microelectronic materials", John Wiley & Sons, p. 129, 1997.

[6] B. Bhushan. "Principles applications of tribology", John Wiley & Sons, p. 1. 1999.

[7] K. C. Ludema, "Friction, wear, lubrication", CRC Press, p. 111. 1996.

[8] P. Powell, "Engineering with polymers", Champman and Hall, p. 89, 1983.

[9] H. D. Seo, S. H. Lee, and H. D. Jeong, "Characterization of the composite conditioning aided by ultrasonic vibration", Electrochemical Society Proceedings, Vol. 99-37, p. 445, 2000.

[10] G. W. Stachowiak, "Engineering Tribology", Elsevier, p. 561, 1993.

[11] N. Chandrasekaran, "Material removal mechanism of oxide and nitride CMP with ceria and silica-based slurries-analysis of slurry particles pre- and post-dielectric CMP", Materials Research Society Proceeding, Vol. 816, p. K9.2.1, 2004.

[12] D. Wang, J. Lee, K. Holland, T. Bibby, S. Beaudoin, T. Cale, "Von-mises stress in chemical mechanical polishing process", J. of Electrochemical Society, Vol. 144(4), p. 1121, 1997.