

〈 논문 〉

CMP시 SiO₂ 슬러리의 마찰 특성과 연마결과에 관한 연구

이현섭* · 박범영* · 서헌덕* · 정재우* · 정석훈* · 정해도†
(2005년 1월 20일 접수, 2005년 3월 2일 심사완료)

A Study on Frictional Characteristics and Polishing Results of SiO₂ Slurry in CMP

Hyunseop Lee, Boumyoung Park, Heondeok Seo, Jaewoo Jung, Sukhoon Jeong
and Haedo Jeong

Key Words: CMP(화학기계적 연마), SiO₂ Slurry(실리카 슬러리), Friction Force(마찰력), Friction Energy(마찰에너지), Coefficient of Friction(마찰계수)

Abstract

The effects of mechanical parameters on the characteristics of chemical mechanical polishing(CMP) can be directly evaluated by friction force. The piezoelectric quartz sensor for friction force measurement was installed, and friction force could be detected during CMP process. Furthermore, friction energy can be calculated by multiplying relative velocity by integration of the friction force throughout the polishing time. SiO₂ slurry for interlayer dielectric(ILD) CMP was used in this experiment to consider the relation of frictional characteristics and polishing results. From this experiment, it is proven that the friction energy is an essential factor of removal rate. Also, the friction force is related to removal amount per unit length(dH/ds) and friction energy has correlation to the removal rate(dH/dt) and process temperature. Moreover, within wafer non-uniformity(WIWN) is related to coefficient of friction because of the mechanical moment equilibrium. Therefore, the prediction of polishing result would be possible by measuring friction force.

1. 서 론

1948년 트랜지스터가 발명된 이후, 진공관 시대를 거쳐서 반도체 기술은 직접회로(IC), 대규모 집적회로(LSI)에 이어서 VLSI와 ULSI의 등장으로 급속도로 발전해 왔다. 그러나 이렇게 고집적화, 고기능화 된 다층배선을 포함하려면 복잡한 3차원 구조가 필요하며, 새로운 디바이스 제조기술

이 요구된다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 반도체 공정에 CMP가 도입되었다. CMP는 기계적인 제거가공과 화학적인 제거가공을 하나의 가공 방법으로 혼합한 연마공정을 말하며 웨이퍼 제조에서부터 소자 및 배선 형성 공정에 이르기 까지 광범위하게 적용되고 있다. CMP에 의한 평탄화(planarization)를 도입한 반도체 공정은 칩 내의 소자 밀도를 증가시키게 되었고, 최소 선폭은 더욱 감소되었다.

CMP는 가공 대상과 목적에 따라서 층간 절연막(ILD: interlayer dielectric)을 형성시키는 산화막(oxide) CMP, 알루미늄(Al), 텅스텐(W), 구리(Cu)와 같은 금속 배선을 형성시키는 금속(Metal) CMP, 소자들 간의 전기적 절연성을 높여 그 동작 특성과 집적도를 향상시키는 소자분리(STI:

† 책임저자, 회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

E-mail : hdjeong@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3210 FAX : (051)518-8442

* 부산대학교 정밀기계공학과

shallow trench isolation) CMP로 분류된다.

CMP에서의 슬러리는 가공 대상에 따라서 pH가 크게 다르며, 슬러리의 입자 역시 SiO₂, CeO₂, Al₂O₃ 등으로 구분된다. ILD CMP의 경우 일반적으로 SiO₂, STI CMP에는 CeO₂, Metal CMP에는 Al₂O₃ 입자를 많이 사용하고 있다.

그리고 CMP에 사용되어지는 패드는 경질 폴리우레탄(foamed crosslinked polymer)이나 폴리우레탄이 함침 또는 코팅된 부직 폴리에스테르 펠트(non-woven polyester felt) 등이 있으며 이러한 패드는 슬러리의 유동을 원활하게 하며 웨이퍼 표면으로부터 반응물을 제거하는 기능을 한다.

이와 같이 CMP가 입자와 패드의 기계적 제거 작용과 슬러리의 화학적 반응을 이용하는 공정이기 때문에 이 두 가지에 대한 분석이 필요하다. 이로 인해, 최근에 CMP 공정 중 마찰력을 모니터링(monitoring)해서 CMP시 연마특성에 관해 연구하고자 하는 노력이 반도체 업체 및 연구소 사이에서 수행되고 있다. 본 논문에서는 ILD CMP에 적용되고 있는 SiO₂ 슬러리의 마찰특성과 연마결과에 대하여 논하고자 한다.

2. ILD CMP와 SiO₂ 슬러리

반도체 디바이스의 다층화에 따라서 층간 절연막의 평탄화가 중요하게 되었다. 이러한 층간 절연막은 BPSG(borophosphosilicate glass), plasma CVD막, 열산화막 등이 있고, 각기 가공조건이 다르기 때문에 CMP시 주의를 요한다. ILD CMP는 배선의 다층화를 겨냥하는 LSI 디바이스의 제조에서 가장 기본이 되는 중요 공정이며, 층간 절연막으로는 SiO₂막이 사용된다.⁽¹⁾ Fig. 1은 ILD CMP의 개략도를 나타내고 있다.

ILD-CMP용 슬러리는 silica계 슬러리가 널리 사용되고 있다. Silica계 슬러리는 크게 fumed

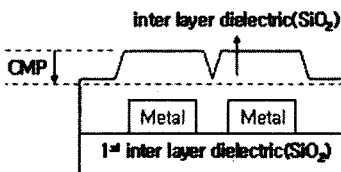


Fig. 1 The schematic of ILD CMP

silica와 colloidal silica가 있다.⁽²⁾ SiO₂ 슬러리는 10~15wt% 정도의 입자가 DIW (de-ionized water)에 균일하게 분산되어 있고, KOH나 NH₄OH를 이용하여 전기적으로 안정시킨 상태로 현탁되어 있으며 pH는 11전후이다.

3. 실험장치 및 조건

실험은 G&P Technology사의 4~6인치 CMP 장비인 GNP POLI400을 사용하였으며, CMP시 발생하는 마찰력을 측정할 수 있도록 piezoelectric quartz sensor를 Fig.2와 같이 연마 헤드부에 설치

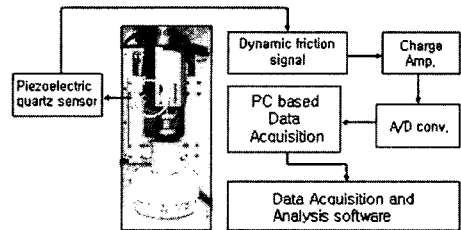


Fig. 2 Flow chart of CMP monitoring system

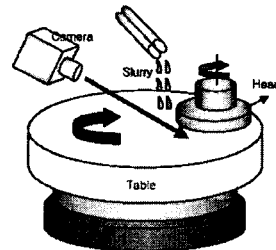


Fig. 3 Schematic diagram for measurement of temperature on pad

Table 1 Experimental condition

Pressure	200 ~ 800g/cm ²
Rotation velocity	Head and Table : 30~110 rpm
Slurry	ILD-1300 TM
Pad	IC1000/Suba400 Stack
Slurry flow rate	150cc/min
Wafer	4inch thermal oxide wafer
Temperature	24°C
Polishing time	1min

하여 센서의 변위를 전압값으로 출력하고 이를 증폭·변환시켜 실시간으로 마찰 신호값을 얻을 수 있도록 하였다. 측정 프로그램은 G&P CMP 모니터링 프로그램을 이용하였다. 연마 중 온도의 측정은 10초 간격으로 웨이퍼와 패드의 접촉이 끝나는 지점의 온도를 적외선 카메라로 측정하였다 (Fig. 3). 자세한 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

연마제거율은 RUDOLPH사의 AUTO-EL장비를 사용하여 측정하였으며, edge 양끝 5mm를 제외하고 웨이퍼 반경방향으로 5mm 간격으로 19지점을 측정하였고, 연마불균일도(within wafer non-uniformity)는 식 (1)의 ASTM(American Society of Testing Materials) 규정의 표준편차균일도(standard deviation uniformity)를 사용하였다.

$$WTWNU = \frac{\sigma}{X_{avg}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

σ 는 표준편차(standard deviation)이며 X_{avg} 는 연마 제거율의 평균값이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 마찰에너지의 측정

CMP시 마찰에너지는 식 (2)와 같이 마찰력(F)을 시간(t)에 따라서 적분하고 상대속도(V_{re})를 곱해주면 구할 수 있다.⁽³⁾

$$Friction\ energy = V_{re} \times \int_0^t F dt \quad (2)$$

즉 Fig. 4에서와 같이 마찰에너지는 마찰력 신호 값의 아래 영역의 면적에 상대속도를 곱한 값으로 정의된다.

4.2 압력 및 속도 변화에 따른 마찰특성

Fig. 5는 가공압력이 고정된 경우, 속도 변화에 따른 마찰에너지와 평균마찰력을 나타낸 그래프이다. 가공속도가 증가할수록 평균마찰력은 감소하지만 마찰에너지는 증가함을 알 수 있다. CMP에서 상대 속도가 증가할수록 평균마찰력이 감소하는 것은 윤활 이론에 따라서 웨이퍼와 패드의 경계면이 슬러리에 의한 동압에 의해서 지지되어 실접촉면적⁽⁴⁾이 줄어들기 때문일 것이라고 생각된다. 따라서 가공압력과 시간이 고정된 경우, 마찰에너지는 마찰력의 감소보다는 상대속도의 증가에 지배적인 영향을 받기 때문에 상대속도가 증가할수록 마찰에너지는 커지게 된다.

Fig. 6은 가공속도를 고정시킨 경우, 압력이 증가할수록 평균마찰력과 마찰에너지는 증가함을 보여주고 있다. 폴리우레탄(polyurethane) 패드는 점탄성변형을 하는 특성이 있다.⁽⁵⁾ 일반적으로 폴리우레탄과 같이 점탄성변형을 하는 고분자 재료는 하중이 가해지는 시점에서 순간적인 탄성 변형을 보이며, 시간이 지남에 따라서 변형이 증가하게 된다. 따라서 가해주는 압력이 증가할수록 패드의 돌기부와 웨이퍼의 접촉면적이 증가하여

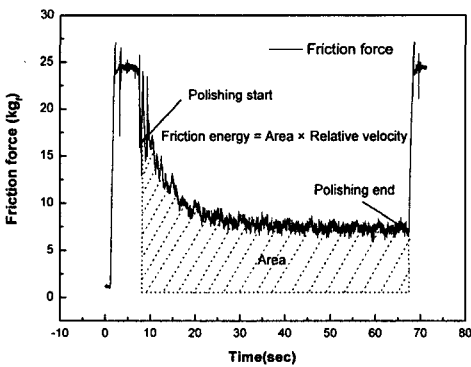


Fig. 4 Measurement of friction energy

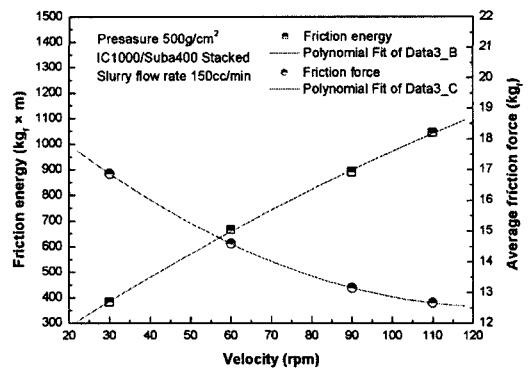


Fig. 5 Friction energy and average friction force as a function of velocity

평균마찰력과 마찰에너지가 증가하는 것으로 보인다. Fig. 7(a)는 패드의 점탄성 거동을 보인 것이며 수직하중에 의한 패드의 압축과 회복을 나타내고 있다. Fig. 7(b)는 패드의 단면사진을 보인 것이다. Fig. 8은 압력과 속도 변화에 따라 패드와 웨이퍼의 접촉을 보여주는 개념도이다.

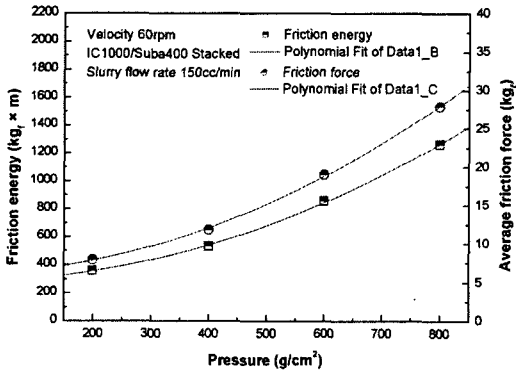
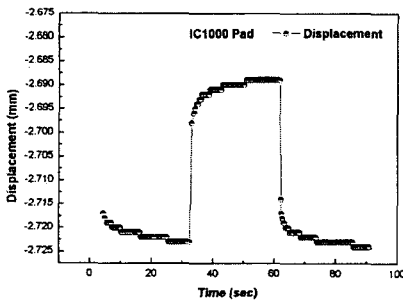
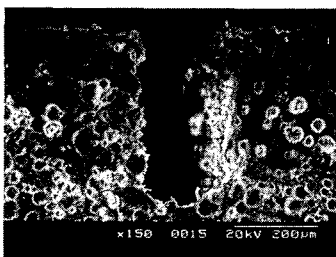


Fig. 6 Friction energy and average friction force as a function of pressure



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Viscoelastic behavior of the pad (b) cross-section of IC1000 pad

4.3 마찰에너지에 따른 CMP 결과

CMP에서 연마 제거율에 관하여 일반적으로 알려진 지배방정식에는 Preston 방정식이 있다.

Preston 방정식⁽⁶⁾ 식 (3)은 연마 제거율(removal rate)이 압력(P)과 상대속도(V)의 곱에 비례함을 나타내고, Preston 상수(k)는 패드의 특성, 슬러리의 특성 등과 같은 여러 가지 변수들을 포함하고 있다.

$$\text{Removal Rate(RR)} = k \cdot P \cdot V \quad (3)$$

Fig. 9에서 압력과 속도를 각각 변화시키면서 1분 동안의 마찰에너지와 연마 제거율과의 관계를 도출해본 결과, 마찰에너지 역시 연마 제거율과 관계가 있으며 마찰에너지가 커질수록 연마 제거율도 커짐을 알 수 있다. 하지만 마찰에너지는 연마불균일도와는 관계가 없었다.

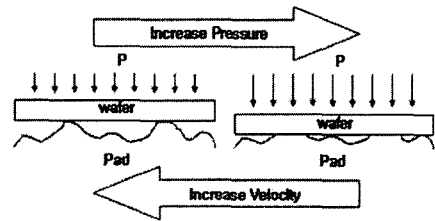


Fig. 8 Schematic of the wafer scale dynamic contact between the pad and the wafer

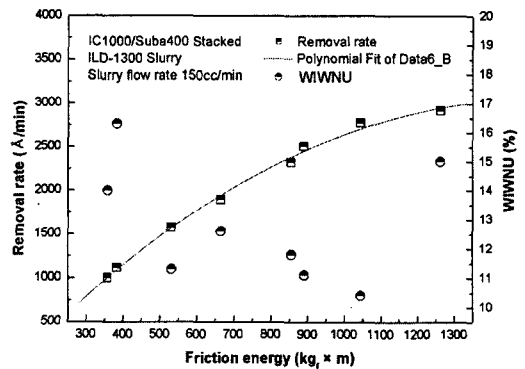


Fig. 9 Removal rate and WIWNU as a function of friction energy

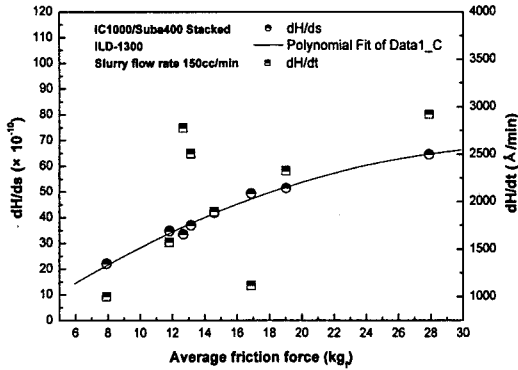


Fig. 10 Removal rate and removal amount per unit length as a function of average friction force

4.4 마찰력에 따른 CMP결과

Fig. 10은 평균 마찰력에 따른 재료 제거율과 단위 거리당 연마 제거량과의 관계를 도시한 것이다. 실험결과, 연마 제거율, 즉 단위 시간당 연마 제거량(dH/dt)은 마찰에너지 또는 압력과 속도의 곱(PV)과 관계가 있지만, 평균마찰력은 Fig. 10에서 보듯이 단위 거리당 연마 제거량(dH/ds)과 관계있음을 알 수 있다.

4.5 마찰에너지에 따른 CMP 공정 온도

화학적인 반응 속도는 개략적으로 분자들이 진동수(시도횟수)와 반응 활성화 에너지를 넘어설 확률의 곱으로 정의되며, 온도가 증가할 때 화학 반응은 알려진 바와 같이 분자의 운동에너지 증가에 의해 반응 활성화 에너지 장벽을 넘어설 확률이 높아지게 되며, 이에 대한 결과로서 반응상수(K)의 값이 커진다는 Arrhenius의 관계식⁽⁷⁾(식 4)을 따르게 된다. 따라서 CMP에서는 공정조건에 따른 온도의 변화가 중요하다.

$$K = A \exp(-E_a/RT) \quad (4)$$

여기서 A는 Arrhenius 상수, E_a는 활성화에너지, R은 기체상수, T는 온도를 뜻한다.

Fig. 11은 각기 다른 연마 제거율을 가지는 압력과 속도 조건에서 CMP시 10초 간격으로 발생하는 온도를 측정하는 것이다. 연마온도의 측정은 적외선 카메라로 실시하였으며 웨이퍼와 패드의 접촉이 끝나는 지점에서의 패드 표면 온도를 측

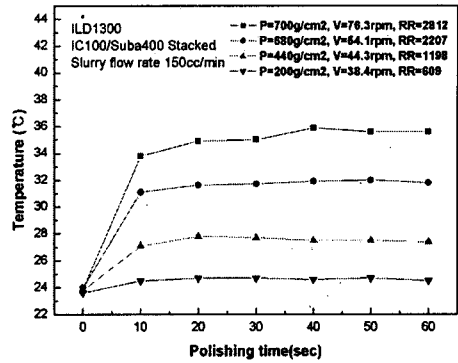


Fig. 11 Temperature as a function of polishing time at the different removal rates

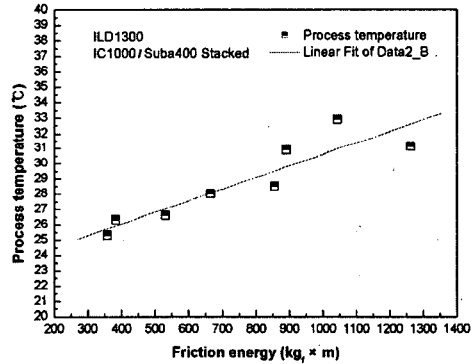


Fig. 12 Average process temperature as a function of friction energy

정하였다. 패드와 웨이퍼 접촉면의 온도를 직접적으로 측정하는 값은 아니지만 CMP 공정 변화에 따른 온도를 측정하여 그 경향성을 파악하는데 큰 무리가 없으리라 생각한다. 연마 제거율이 큰 경우 마찰에 의해서 발생하는 온도 역시 크게 나타나고 있다.

또한 Fig. 12에서 보듯이 마찰에너지가 증가함에 따라 공정 온도가 상승하고 있음을 알 수 있다. 이러한 공정 중 온도상승은 슬러리의 화학반응 속도를 높일 것으로 예상된다.

4.6 평균 마찰계수에 따른 CMP 결과

CMP에서 연마불균일도에 영향을 미치는 요소는 크게 화학적인 요소인 슬러리와 기계적인 요소인 소모품 그리고 연마조건에 따른 장비의 특

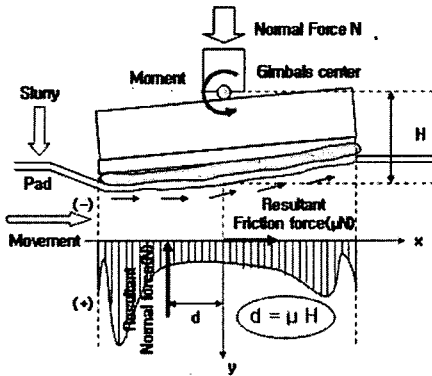


Fig. 13 Schematics for the moment balance of the head

성으로 나눌 수 있다. 따라서 공정 중 슬러리와 소모품에 변화를 주지 않는다면, 연마불균일도는 연마조건에 따른 장비의 기계적인 특성에 의존하게 된다.

Fig. 13은 CMP 장비의 연마 헤드를 나타낸 것이다. CMP 장비의 연마 헤드는 웨이퍼가 패드의 표면을 추종할 수 있도록 짐벌센터(gimbals center)를 중심으로 요동할 수 있도록 설계되어 있다. 만약 패드와 웨이퍼 사이에 마찰력이 존재하는 경우 패드와 웨이퍼 사이에 작용하는 수직 응력⁽⁸⁾의 합력(resultant force)은 연마 헤드의 모멘트 균형을 위해 웨이퍼가 진행하는 방향 쪽으로 형성된다.

여기서 H는 헤드의 회전 중심에서부터 등가 힘의 수직 작용점까지의 거리, d는 회전 중심에서부터 등가 힘의 수평 작용점까지의 거리, N은 수직하중, 그리고 μ 는 마찰계수를 뜻한다. 따라서 마찰계수(μ)가 커질수록 등가 힘의 수평작용점까지의 거리(d)가 커지게 된다. 이는 웨이퍼의 외주부의 연마 제거율을 높이게 되고, 연마불균일도 또한 높아지게 되는 것이다.

$$\sum M_0 = 0; \quad H \mu N - Nd = 0 \quad (5)$$

Fig. 14는 실험을 통하여 평균 마찰계수와 연마불균일도와의 관계를 도시한 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 연마불균일도는 평균 마찰계수가 증가할수록 커지고 있지만 연마 제거율과는 무관함을 알 수 있다.

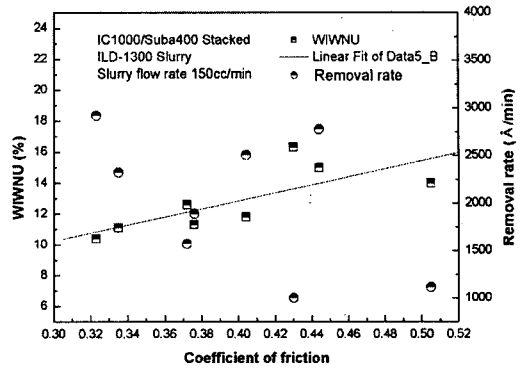


Fig. 14 WIWNU and removal rate as a function of coefficient of friction

5. 결론

본 연구에서는 CMP시 SiO₂ 슬러리의 연마특성을 파악하기 위하여 마찰력 모니터링 장치를 이용하여 측정된 데이터와 연마결과와의 상관관계를 분석하였다.

가공압력과 속도에 변화를 준 후 마찰력과 마찰에너지를 측정된 결과, 마찰력의 변화는 패드와 웨이퍼의 실접촉면적과 관계가 있고, 마찰에너지는 가공압력과 가공속도가 증가할수록 커짐을 알 수 있었다.

또한, 마찰 특성 중 연마 제거율에 영향을 미치는 인자는 preston 방정식에서의 압력과 상대속도의 곱(PV)뿐만 아니라, 연마시간 1분 동안의 마찰에너지도 연마 제거율에 근사적으로 비례함을 알 수 있었다. 발생된 마찰에너지는 CMP 공정 중, 온도 변화에 영향을 미치며 이는 슬러리의 화학반응 속도를 높이는 역할을 하게 된다. 그리고 연마불균일도는 평균 마찰계수가 커짐에 따라서 증가하였으며, 이는 CMP 장비의 연마헤드에서 등가 힘의 수평작용점까지 거리(d)가 연마불균일도에 영향을 미치기 때문일 것이다.

따라서 마찰력 모니터링 장치를 이용하여 CMP 공정에서의 마찰에너지와 연마제거율, 마찰계수와 연마불균일도를 데이터화 하면, CMP장비의 가공조건에 따른 연마결과를 보다 쉽게 예측할 수 있을 것이라 생각된다.

참고문헌

- (1) Ho-Youn Kim, 2002, "Development of Fixed Abrasive Pad Using Hydrophilic for Improvement of Planarity in CMP," ph.D. qualifying dissertation of Pusan National University, p. 114.
- (2) Oliver, M.R., 2004, "Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor Materials," Springer, pp. 235~236.
- (3) Hyunseop Lee, Boumyoung Park, Gooyoun Kim, Hyoungjae Kim, Heondeok Seo and Haedo Jeong, 2004, "Effects of Friction Energy on Polishing Results in CMP Process," *Journal of the KSME(A)*, Vol. 28, No. 11, pp. 1807~1812.
- (4) Hyoungjae Kim, 2003, "A Study on the Interfacial Characteristics and Its Effect on Material Removal in CMP," ph.D. qualifying dissertation of Pusan National University, pp. 62~64.
- (5) Powell, P., 1983, "Engineering with polymers," Chapman and Hall, p. 89.
- (6) Preston F.W., 1927, "The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines," ph.D., A.M.I.C.E, *Journal of The Society Glass Technology*, Vol.11(44), pp. 214~256.
- (7) Carey, F., 2003, "Organic Chemistry," 5th edition, Boston, Mc Graw Hill.
- (8) Wang, D., Lee, J., Holland, K., Bibby, T., Beaudoin, S. and Cale, T., 1997, "Von-Mises Stress in Chemical Mechanical Polishing Process," *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 144(4), p. 1121.