

슬러리 온도 및 유량에 따른 CMP 연마특성

정영석[#], 김형재^{*}, 최재영^{*}, 정해도^{**}

The Effect of Slurry Flow Rate and Temperature on CMP Characteristic

YoungSeok Jeong [#], HyoungJea Kim ^{*}, Jaeyoung Choi ^{*} and HaeDo Jeong ^{**}

ABSTRACT

CMP (Chemical-Mechanical Polishing) is a process in which both chemical and mechanical mechanisms act simultaneously to produce the planarized wafer. CMP process is an extensive usage and continuing high growth rates in the semiconductor industry. The understanding of the process, however, is much slower. The nature of material removal from the wafer is still undefined and ambiguous. Material removal rate according to the slurry flow rate is also undefined and ambiguous. Thus, in this study, the basic mechanism of material removal rate as slurry flow rate is defined in terms of energy supply and energy loss.

Key Words : CMP (화학 기계적 연마), Slurry flow rate (슬러리 공급비율), Cooling effect (냉각효과), Chemical energy (화학 에너지), Removal rate (연마율), Energy supply (에너지 공급), Energy loss (에너지 손실), Temperature (온도), Heat generated (열 발생)

기호설명

RR	= Material removal rate
k	= Preston's constant
P	= Pressure
V	= Velocity
E_{Supply}	= Input energy in CMP process
E_{Loss}	= Loss energy in CMP process
$E_{Mean Removal}$	= Used energy for material removal
$q_{Convection}$	= Heat flux rate by convection.
$q_{Conduction}$	= Heat flux rate by conduction.

1. 서론

IC 산업의 발전과 더불어 칩의 대용량화와 연산 속도의 증가가 요구되는 것에 따라 설계법칙은 점점 더 엄격해 지고 있다. 이로 인하여 요구되는 최소 선폭이 서브마이크론(sub-micron) 이하로 좁아지게 되었다. 배선 구조는 메모리 (Memory) 디바이스가 2~4 층 그리고 로직(Logic) 디바이스는 4~7 층, 또는 그 이상을 목표로 하고 있다. 디바이스의 배선 구조는 증착하는 배선수의 증가에 따라 요철이나 굴곡이 증대되므로 복잡한 배선 구조를 실현하는 것이 매우 곤란하다. 따라서 고도의 배선 구조를 실현하기 위해서는 디바이스 제조 과정

접수일 : 2004 년 2 월 23 일 ; 게재승인일 : 2004 년 8 월 13 일

교신저자, 부산대학교 정밀기계공학과
Email jeongys@Pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3210

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 부산대학교 정밀정형 및 금형 가공(ERC)

에서 미세 요철이 있는 웨이퍼 위의 표면 형상을 국소 및 광역 평탄화하는 기술이 요구된다. 최근에는 이러한 평탄화 기술 중 하나인 CMP(Chemical Mechanical Planarization) 기술이 부각 되고 있다.

평탄화 기술 중 하나인 CMP 는 슬러리(Slurry)에 의한 화학적 반응과 패드와 웨이퍼 사이의 상대운동에 의한 기계적 작용의 상승효과에 의하여 재료의 표면에 결함을 남기지 않고 연마하는 방법이다¹. Fig. 1 은 CMP 기술의 연마 기구도 이다.

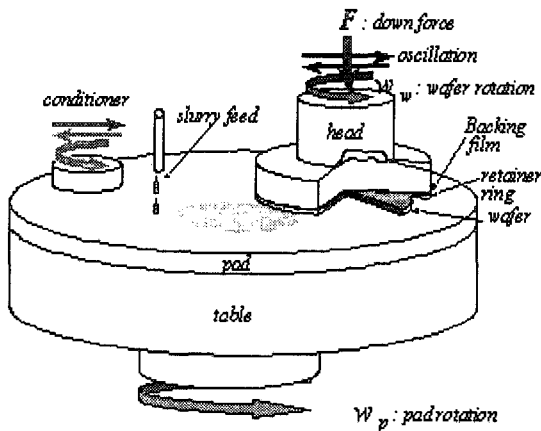


Fig. 1 Concept of conventional CMP

CMP 공정에 있어서 해결 해야 할 중요한 과제가 몇 가지 있는데 그 중에서 웨이퍼 전면에서의 광역 평탄도를 달성해야 하는 과제가 있다. 광역 평탄도는 연마 균일도에 의하여 평가된다.

이러한 CMP 공정의 연마 균일도와 평탄화 특성에 영향을 미치는 인자로는 슬러리의 pH, 온도, 점도, 연마 입자의 크기, 모양, 연마 패드의 탄성, 경도, 표면 거칠기, 포어 크기(Pore size), 슬러리 유동 홈의 형상 등이 있다. 이와 같이 많은 인자가 복합적으로 작용하여 CMP 가공이 이루어 지므로 각각의 인자들이 연마에 어떠한 영향을 미치는 지를 규명해야 하며 현재 이에 대한 많은 연구가 수행 중 이다.

그러나 배선구조가 다층화 되면서 반도체 산업에서 CMP 기술이 많이 이용되는 것에 비하여 CMP 공정의 여러 인자들에 대한 명확한 규명은 상대적으로 미비한 상태이다². 따라서 CMP 현상의 규명과 그 구성 인자들의 역할에 대한 명확한

이해가 절실히 요구 되고 있다.

본 연구에서는 CMP 공정에서 발생하는 현상에 대한 명확한 규명을 위하여 에너지 공급과 손실 관점에서 여러 인자들의 상호 작용에 의하여 이루어지는 CMP 과정을 고찰하고, CMP 에서 사용되는 기계적 에너지와 화학적 에너지의 발생 원인을 규명하였다.

또한 화학적 에너지 공급에 영향을 미치는 슬러리 유량과 온도 변화에 따른 연마율(Removal rate)의 변화를 해석 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 온도 변화와 연마특성

연마율은 가공 온도에 영향을 많이 받으며 온도 상승에 비례하여 증가한다. 이것은 일반적으로 온도가 상승 할수록 화학 용액인 슬러리의 활성화도(Activity)가 증가하여 화학 반응성이 증가하기 때문이다³.

또한 연마 온도가 상승하게 되면 패드의 전단 계수(Shear-Moduli)가 감소하게 되어 연마 균일도를 증가 시키며 온도가 증가할수록 연마율은 증가하게 된다⁴.

그러므로 CMP 공정에서 발생하는 온도 변화는 연마 결과에 중요한 인자이다. CMP 공정은 웨이퍼 표면의 재료를 제거하기 위하여 기계적, 화학적 에너지를 필요로 한다. 공급되는 에너지는 온도로 표현되며 연마 온도는 패드의 온도 분포에 영향을 주어 연마 결과에 관계하게 된다.

2.2 슬러리 공급량의 변화와 연마결과

슬러리의 공급 유량은 연마 결과에 영향을 미친다. 슬러리의 공급 유량이 증가 할수록 박막과의 반응에 관여하는 정도와 연마에 관여하는 연마 입자의 공급이 증가하여 연마율도 증가하게 된다.

그러나 슬러리 공급 유량이 증가하면 연마율도 비례해서 증가 하는데 슬러리의 유량이 경계지점(Threshold Point)을 넘어서면 더 이상 연마율이 증가하지 않는 현상이 발생하게 된다⁵.

이와 같은 슬러리 유량의 공급변화에 따른 연마율 곡선에서 경계지점(Threshold Point)은 CMP 공정에서 잘 알려져 있는 현상이다. 그러나 그 원인에 대한 명확한 규명은 아직 이루어 지지 않고 있다.

2.3 에너지 보존 모델

CMP 공정에서 연마율은 다음과 같은 Preston's equation 으로 표현 할 수 있다⁶.

$$RR = k * P * V \quad (1)$$

CMP 공정은 슬러리에 의한 화학반응으로 재료의 표면에 생성된 연화된 반응층을 물리적인 하중을 가하여 슬러리 내의 연마 입자가 패드와 웨이퍼 사이의 상대 운동을 통하여 기계적인 마멸 작용으로 재료를 제거해 나가게 된다. 이때 재료제거를 위하여 공급되는 압력과 속도의 상호작용이 화학 기계적인 에너지로 전환되어 재료의 표면을 제거해 나가게 되며 연마율과 비례관계를 가지게 된다. 공급되는 압력에 의하여 패드와 웨이퍼가 접촉하게 되고 이 접촉으로 인한 마찰에 의하여 연마열이 발생하게 된다⁷. 이것은 패드의 온도 상승에 기인하게 되어 연마 결과에 영향을 미치게 된다.

연마 결과에 영향을 미치는 마찰에 관계한 인자는 웨이퍼 표면의 필름, 패드, 슬러리, 가공 압력 그리고 가공 속도 등이 있다. 이러한 여러 인자들은 가공 중 마찰에 의해 열 에너지로 전환되어 연마열로 표현 되어진다.

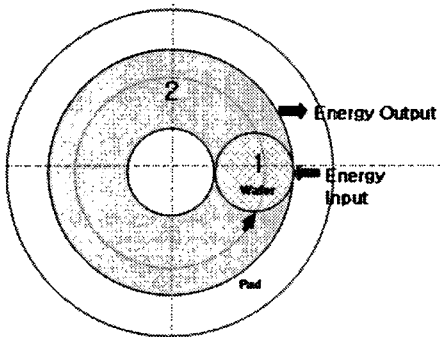


Fig. 2 The Energy cycle for a particular point on the pad during CMP process.

그러므로 Fig. 1 의 CMP 장비의 기구학적 구성에 따라 Fig. 2 는 연마 상태에서 에너지를 공급 받게 되는 구간 1 과 공급받은 에너지를 대류와 전도 등에 따라 손실하게 되는 구간 2 로 구분한 그림 이다.

CMP 공정은 패드의 일정부분이 웨이퍼와 주기로 접촉하기 때문에 일정간격으로 에너지를 공급 받고 다시 손실하는 과정을 반복하게 된다. 연마 중 주기적으로 공급되는 에너지는 웨이퍼 표면과 패드 그리고 슬러리의 마찰에 의하여 열에너지로 전환되고 일부는 재료의 제거에 사용되며 일부는 손실된다. 이와 같은 연마과정의 에너지 흐름을 Fig. 3 에 나타내었다.

Fig. 3 에서 보여지는 것과 같이 CMP 공정에서 공급되는 에너지에는 기계적 에너지와 화학적 에너지가 있다. 공급되는 에너지는 패드와 웨이퍼 그리고 슬러리의 접촉에 의하여 마찰 에너지로 변환된다. 변환된 마찰 에너지 중 일부는 직접적인 재료 제거에 사용되고 일부는 열에너지 형태로 변환된다. 변환된 열에너지 중 일부는 연마 온도 상승에 관여해 재료 제거에 사용되고 일부는 손실된다. 손실되는 에너지는 크게 대류 현상에 의한 것과 전도 현상에 의한 것으로 구분 할 수 있다. 대류현상에 의한 에너지 손실은 패드, 슬러리로부터 대기로의 에너지 손실이 있다. 그리고 전도 현상에 의한 에너지 손실은 패드에서 웨이퍼, 패드에서 테이블, 웨이퍼에서 패드, 슬러리에서 패드로의 열에너지 손실이 있다. 또한 슬러리의 공급에 의하여 패드와 웨이퍼의 온도 감소, 즉 냉각 효과(Cooling effect)가 발생하게 되며 이것으로 인한 열 에너지의 손실이 있다.

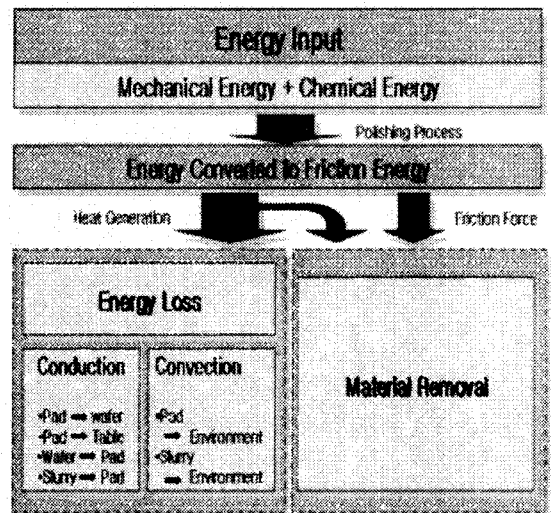


Fig. 3 Energy Flow in CMP process.

Fig. 3 의 내용은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$E_{Supply} = E_{Mean\ Removal} + E_{Loss} \quad (2)$$

수식 (2)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$E_{Mean\ Removal} = E_{Supply} - E_{Loss} \quad (3)$$

수식 (3)에서 공급되는 에너지에서 손실되는 에너지를 제외한 부분이 실질적으로 재료의 제거에 관여하게 된다. 따라서 CMP 공정에서 중요한 연마 결과의 특성에 관한 명확한 이해를 위해서는 연마 공정에서 손실되는 에너지 부분에 관한 고찰이 중요한 요소가 된다.

그러므로 손실되는 에너지에 관계되는 인자를 표현하면 수식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_{Loss} = q_{Convection} + q_{Conduction} \quad (4)$$

식 (4)와 같이 손실되는 에너지는 열에너지의 형태로 손실되고 이러한 인자들 중 가장 큰 영향을 미치는 것은 슬러리(Slurry)에 의한 냉각 효과라고 알려져 있다⁸.

그러므로 본 연구에서는 손실되는 에너지에서 중요한 요소가 되는 슬러리의 유량과 온도를 조절하여 화학 에너지 공급의 변화와 냉각 효과의 영향에 따른 연마율의 특성을 고찰 하였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험 조건

본 실험에서는 CMP 공정 중에서 슬러리의 유량과 온도 변화에 따른 연마율의 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 4 과 같이 실험 장치를 구성하였다.

CMP 장비는 지엔피 테크놀로지 (G&P TECHNOLOGY)사의 POLI 400 장비를 사용하였다. 실험 중 외부환경에 의한 온도변화를 최소화하기 위하여 일정한 온도가 유지되는 클린룸(Clean room)에서 외부 온도를 23℃로 일정하게 유지 하였다. 연마에 사용되는 CMP 장비와 테이블의 온도 또한 외부온도와 같은 23℃로 일정하게 유지 하였다. 연마 실험 시 마찰에 의하여 연마 온도가 상승되게 된다. 상승된 온도는 연마율의 변화를 가져오게 되

어 정확한 실험 결과를 얻을 수 없다. 따라서 이러한 연마 온도의 누적을 제거하기 위하여 매 실험 후 증류수로 충분히 냉각 시켰다. 그리고 모든 실험 전 적외선(IR) 카메라를 이용하여 장비, 패드 및 슬러리의 온도를 외부 온도와 같은 상태를 유지한 후 실험을 수행 하였다

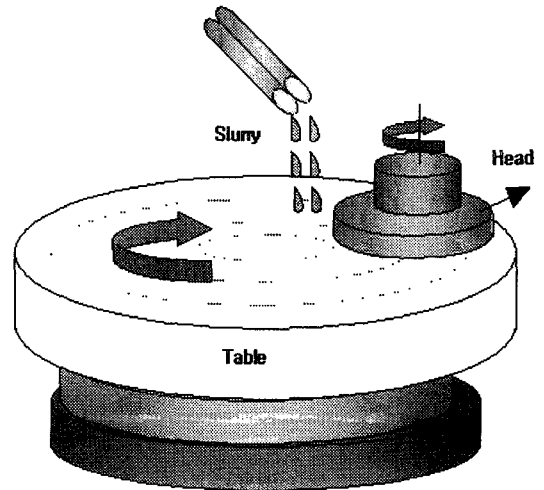


Fig. 4 Experimental set up

슬러리의 유입 위치에 따른 변화 요인을 줄이기 위하여 모든 실험 과정에서 패드의 중심으로부터 74mm 떨어진 지점에서 일정하게 공급하였다. 연마 중 패드의 표면상태 변화에 의한 영향을 줄이기 위하여 모든 실험 시행 전 20 초 동안 컨디셔닝을 수행하였다. 컨디셔너(Conditioner)는 4 인치 다이아몬드 컨디셔너를 사용하였다. 다른 실험 조건들은 Table 1 에 나타내었다

Table 1 Experimental Condition

	Condition or Type
Pad	IC 1400™ (Hard/Soft stacked, Rodel)
Slurry	ILD 1300™ (Rodel)
Pressure	500g/cm ²
Velocity	Table : 60 rpm Head : 60 rpm
Work Piece	SiO ₂

공급되는 화학에너지의 변화를 조절하기 위하여 슬러리 공급 유량은 10, 25, 50, 100, 200, 400ml/min 으로 조절 하였다. 손실되는 냉각 에너지의 조절을 위하여 슬러리 온도는 35℃의 고온과, 23℃의 상온 그리고 13℃의 저온으로 실험 하였다

3.2 실험결과 고찰

슬러리의 공급유량과 온도를 변화 시키며 실험한 결과를 Fig. 5 에 나타내었다.

Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 상온(23℃)과 상온보다 낮은 온도(13℃)의 슬러리를 공급하는 경우 슬러리의 공급량을 증가 시키면 일정 수준까지 연마량이 급격히 증가하게 된다. 슬러리의 공급량을 증가시키면 공급되는 화학 액의 양이 많아지기 때문에 화학반응이 더욱 활발하게 되고, 연마에

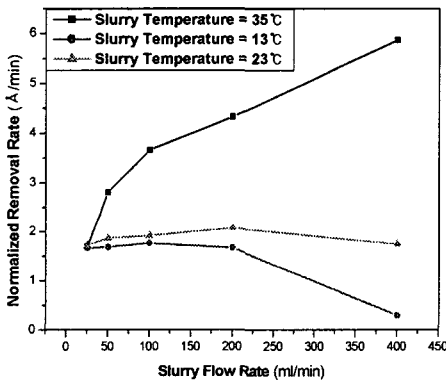


Fig. 5 Removal rate variation with flow rate of slurry. The temperature of supplied slurry was controlled from 13℃ to 35℃.

참여하는 입자의 양이 많아지기 때문에 연마량이 증가하는 것으로 생각할 수 있다.

또한 공급량이 점차 증가하여 웨이퍼 박막과 충분히 반응하고도 잉여 양이 생기는 유량에 이르는 경우, 즉 공급되는 화학적 에너지가 한계에 이르는 경우(Cheical activation limits) 유량을 증가 시키더라도 더 이상 연마량은 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 화학적 에너지의 한계에 이르는 유량을 넘어서면 연마율이 감소하게 되는데 이는 공급되는 슬러리가 냉각 작용을 하는 것으로 생각 된다. 이러한 슬러리의 냉각 작용에 의한 연마율의 감소 현상은 패드의 온도와 슬러리의 온도가 유사

해 지는 유량(Cooling effect limit)까지 이어진다.

일반적으로 슬러리의 유량이 증가함에 따라 연마량은 증가하게 된다. 그러나 일정 유량을 넘어서면 연마율은 더 이상 증가 하지 않게 된다. 이러한 결과는 Fig. 5 에서 확인 할 수 있고 화학적 에너지의 공급과 냉각 효과에 의하여 설명 할 수 있다.

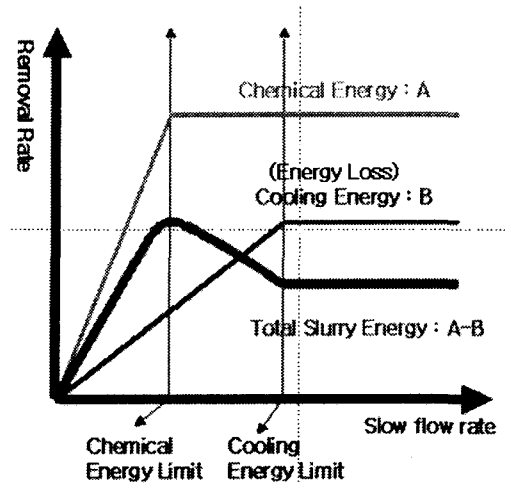


Fig. 6 Conceptual diagram of reaction energy or removal rate as a function of flow rate and low temperature of slurry.

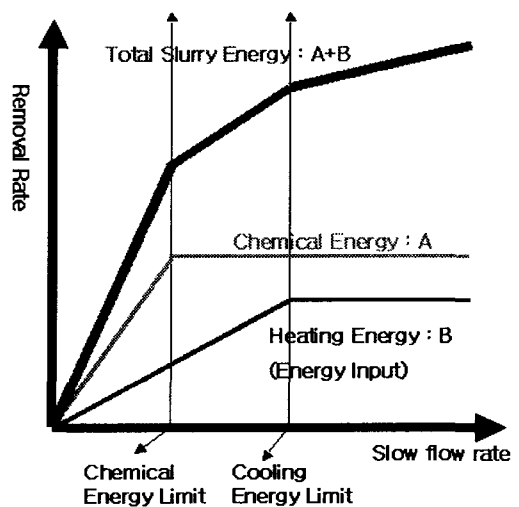


Fig. 7 Conceptual diagram of reaction energy or removal rate as a function of flow rate and high temperature of slurry.

상온보다 높은 35℃의 슬러리를 이용하여 실험하였을 경우 유량에 따라 공급되는 화학에너지에 의하여 연마율이 급격히 증가하게 되고 상온과 저온의 슬러리의 냉각 효과와는 달리 유량이 증가할수록 추가로 열에너지가 공급되기 때문에 유량에 따른 온도 증가율의 크기는 감소하나 실험영역 내에서 계속 증가하는 것을 알 수 있다.

슬러리의 공급 유량이 증가할수록 화학적 에너지(Chemical Energy)는 화학적 에너지가 한계에 이르는 지점까지 증가할 것이며 슬러리의 온도에 따라 냉각 에너지(Cooling Energy) 또한 냉각 효과의 한계 지점까지 증가하게 될 것이다. 이와 같은 화학적 에너지와 냉각 효과에 의한 상호관계에 의하여 나타나는 연마율의 변화 현상은 Fig. 6, Fig. 7과 같이 표현할 수 있다.

상온과 상온보다 낮은 온도 슬러리의 경우 Fig. 6에서와 같이 상온과 상온보다 낮은 슬러리 온도에 의한 냉각 효과가 크기 때문에 공급되는 화학에너지와의 상호작용에 의해 연마율이 더 이상 증가하지 않는 지점이 빨리 나타나게 되어 일정유량이 지난 후 연마율이 더 이상 증가하지 않는 경향을 보이게 된다. 상온보다 높은 온도의 슬러리가 공급되는 Fig. 7에서는 공급되는 화학 에너지 뿐만 아니라 슬러리의 온도에 의하여 열에너지가 추가로 공급되기 때문에 연마율이 지속적으로 증가하는 경향을 보이게 된다. 이와 같이 Fig. 5의 슬러리의 유량과 온도 변화에 따른 연마율의 결과는 공급되는 슬러리의 유량에 따른 화학에너지의 변화량과 슬러리의 온도에 따른 냉각 효과의 변화에 의하여 설명할 수 있다.

4. 결론

CMP에서 연마율의 변화는 공급되는 슬러리의 유량과 온도에 의해 달라지게 된다. 슬러리의 온도가 높을수록 그리고 유량이 증가할수록 연마율은 증가하게 된다. 그러나 슬러리 유량이 경계지점(Threshold point)을 넘어서면 연마율이 더 이상 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같이 공급되는 슬러리의 온도와 유량에 따라 그 증가율은 다른 현상을 보이게 된다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 에너지 공급과 손실의 관점에서 설명할 수 있다.

상온과 저온의 슬러리가 공급되는 경우 슬러리

의 유량이 증가할수록 화학적 에너지의 증가로 일정 유량 동안 연마율이 증가 하지만 더 많은 슬러리가 공급되는 경우 낮은 슬러리의 온도로 인해 냉각 효과가 증가되기 때문에 연마율이 더 이상 증가하지 않게 된다. 그러나 슬러리의 온도가 연마공정온도 이상이 되는, 즉 냉각효과에 의한 에너지 손실이 없는 공정에서는 실험 영역 내에서 슬러리 공급량의 증가에 따라 연마율이 증가하게 된다.

본 연구에서는 슬러리 조건 변화에 따른 연마 결과를 에너지 보존 관점을 통해 설명하였다. 이를 통하여 CMP 가공에서 연마율 획득에 필요한 슬러리의 공급 유량과 온도를 보다 효율적으로 설정할 수 있을 것으로 사료되며 적절한 공정 조건을 찾을 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Kim H.J., "A Study on the Interfacial Characteristics and Its Effect on Material Removal in CMP," Ph. D Thesis, PNU, 2003.
2. Mullany B. and Byrne G., "The effect of slurry viscosity on chemical-mechanical polishing of silicon wafers," J. of Material Processing Technology, Vol. 132, pp. 28-34, 2003.
3. Liu Yuling, Zhang Kailiang, Wang Fang and Di Weiguo, "Investigation on the final polishing slurry and technique of silicon substrate in ULSI," Microelectronic Engineering, Vol. 66, pp. 438-444, 2003.
4. Li Weidan, Shin D.W, Tomozawa Minoru and Murarka Shyam P., "The effect of polishing pad treatments on the chemical-mechanical polishing of SiO₂ films," Thin Solid Films, Vol. 270, pp. 601-606, 1995.
5. Robert L. Rhoades, Ph.D., "Oxide CMP using klebosol slurries," IPEC-Planar PACRIM Chemical Mechanical Planarization Symposium Fall Session, pp. 51-93, October, 1997
6. Srinivasa-Murthy C., Wang D., Beaudoin S.P., Bibby T., Holland K and Cale T.S., "Stress distribution in chemical mechanical polishing," Thin Solid Films, Vol. 308-309, pp. 533-537, 1997.

7. Hocheng H., Huang Y.L. and Chen L.J., "Kinematic Analysis and Measurement of Temperature Rise on a Pad in Chemical Mechanical Planarization," J. of The electrochemical Society, Vol. 146, No. 11, pp. 4236-4239, 1999.
8. White D., Melvinand F., BoningD., "Characterization and Modeling of Dynamic Thermal Behavior in CMP," J. of The Electrochemical Society, Vol. 150, No. 4, pp. G271-G278, 2003.