

다결정 실리콘 CMP의 기계적 재료제거 특성 Mechanical Material Removal Characteristic in Polycrystalline Silicon CMP

*신운기¹, 정문기², 이영균³, 이창석⁴, #정해도⁵

*W. K. Shin¹, M. K. Jeong², Y. K. Lee³, C. S. Lee⁴, #H. D. Jeong(hdjeong@pusan.ac.kr)⁵

¹ 부산대학교 기계공학과부 정밀가공시스템

Key words : Material Removal Rate(MRR), Chemical Mechanical Polishing, Polycrystalline Silicon,

1. 서론

CMP 공정은 웨이퍼와 패드 두 면의 상대운동과 상대운동면 사이에 화학적 반응성을 가진 유체인 슬러리를 공급하면서 연마가 이루어진다. 따라서 박막과 슬러리 내에 포함되어 있는 다양한 화학액에 의해 반응 표면층이 형성되고 이 층이 슬러리 내에 포함되어 있는 입자에 의해 제거된다. 일반적으로 화학적인 재료 제거과정은 에칭(etching)에 의하여 발생하는 과정인데 CMP에서 에칭율이 증가하는 경우 평탄화 특성이 나빠지게 된다. 따라서 슬러리와 박막의 화학적 반응에서 에칭에 의해서 재료의 제거가 일어나는 현상을 피하도록 슬러리 조성을 구성하게 된다. 따라서 대부분의 박막 재료 제거의 최종 역할은 기계적인 마찰과 입자의 마멸현상에 의해 이루어지게 되며, 이러한 원인으로 인하여 재료제거의 특성은 박막과 입자의 경도, 패드의 탄성, 연마 압력, 상대 속도 등의 기계적인 인자에 강하게 영향을 받으며 미시적인 관점에서는 패드와 웨이퍼의 접촉 계면에서 일어나는 현상이 연마 현상에 강한 영향을 미치게 된다[1]. 본 논문에서는 반도체 소자의 고집적화에 따른 트랜지스터 게이트로 널리 사용되는 다결정 실리콘 (Polycrystalline silicon) CMP 공정에서 CMP 특성에 미치는 기계적 영향에 대해 알아보고 요소들을 변화시켰을 때 재료제거 특성과 표면상태의 변화를 알아보고자 한다.

2. 실험방법 및 조건

슬러리에 포함되는 콜로이드 실리카 입자(Colloidal silica abrasive)의 농도를 변화시켜가면서 입자의 농도가 단결정 실리콘과 다결정 실리콘 CMP에 미치는 영향을 확인하였다. 에칭 용액은 테트라메틸 암모늄 하이드록사이드(TMAH; tetramethyl ammonium hydroxide)에 초순수(DIW; deionized water)를 섞어 제조하였다. 본 실험에서 사용된 슬러리의 입자는 31nm의 평균 크기를 가지고, 0.2wt%의 TMAH based slurry에 콜로이드 실리카 입자를 1~10wt% 증가시켜 실험을 수행하였다. 패드와 웨이퍼 사이의 상대운동 속도와 압력에 따른 재료의 제거 특성을 알아보기 위해, 연마 압력과 헤드 및 테이블의 속도를 변화시켜 실험을 진행하였다. CMP 공정 중에 재료 제거 상태를 직접적으로 눈으로 관측하는 것은 힘들다. 따라서 CMP 마찰력과 온도

Table 1 Polishing conditions

Parameters	Condition
CMP equipment	POLI-400 polisher (G&P Technology)
Polishing Pressure	100, 300, 500, 700g/cm ²
Polishing Velocity	Table/Head : 30/30, 60/60, 90/90, 120/120 rpm
Wafer	Bare silicon wafer 4" Poly-Si 4" (1 μ m)
Slurry	Alkaline agent (TMAH) ; 0.2wt% Colloidal silica Abrasive ; 0~10wt% Flow rate : 120cc/min
Pad	Poly-urethane pad IC-1400 k-groove
Conditioning method	ex-situ, diamond conditioner
Thickness measurement	Precision weighting machine (OHAUS) Thin film thickness measurement system (K-mac)

신호의 획득은 CMP 공정 중에 실시간 모니터링을 통해서 많은 CMP의 정보를 얻을 수 있기 때문에 아주 중요하다. CMP 장비의 헤드 뒤쪽에 피에조 힘센서(Piezoelectric force sensor)를 장착하여 CMP 공정 동안에 발생하는 마찰력을 실시간으로 측정하였다[2].

3. 실험 결과 및 고찰

연마 시 슬러리 내의 입자의 농도는 연마에 주요한 영향을 미친다[3]. 단위 체적 내에 존재하는 입자의 개수는 연마 시 하나의 입자에 부가되는 하중을 결정하게 되고 재료 제거에 참여하는 비중을 결정하게 되며 따라서 전체 마찰력의 크기와 연마제거율을 결정하게 된다. Fig. 1은 TMAH 슬러리에서 입자 농도에 따른 연마 제거율을 나타낸다. 단결정 실리콘과 다결정 실리콘 모두 입자의 농도가 증가할수록 연마제거율이 증가하고, 단결정 실리콘의 연마제거율이 다결정 실리콘에 비하여 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 특히, 입자를 넣지 않은 슬러리를 사용하여 CMP 공정을 하게 되면 연마제거율이 거의 0Å/min에 가깝게 나왔다. 이는 수산화 이온(OH⁻)에 의해 약해진 다결정 실리콘 표면이 입자의 영향 없이는 거의 연마가 이루어지지 않았음을 확인할 수 있다.

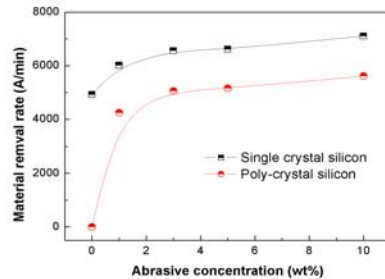


Fig.1 Material removal rate according to abrasive concentration

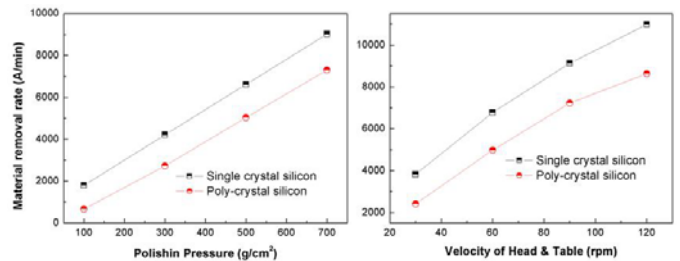
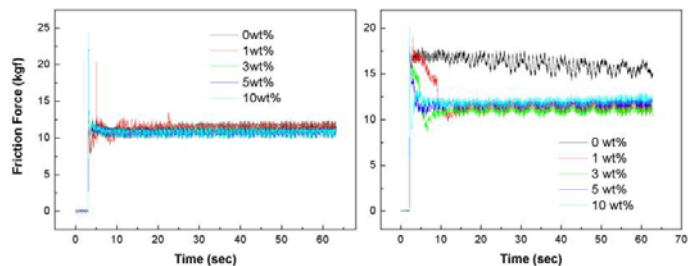


Fig.2 Removal rate as a function of pressure and velocity



(a) Single crystal silicon (b) Poly-crystal silicon

Fig.3 Friction signal as a function of abrasive concentration

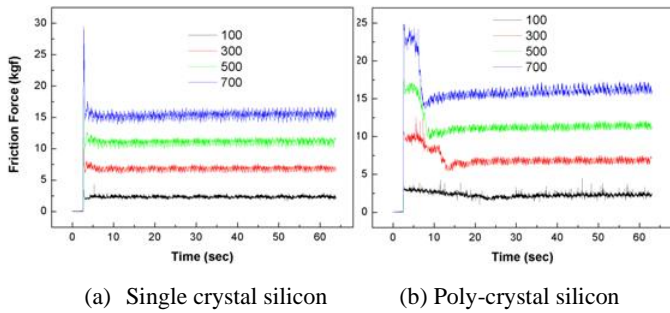


Fig.4 Friction signal as a function of polishing pressure

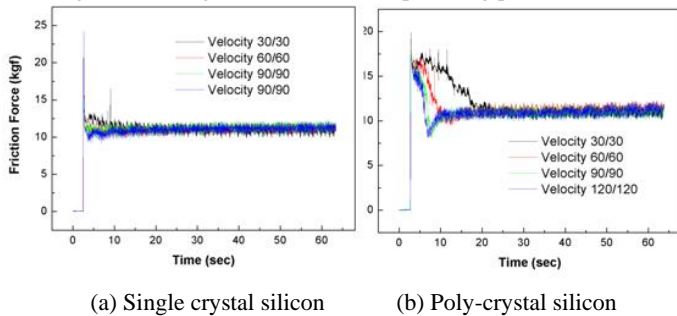


Fig.5 Friction signal as a function of velocity of head/platen

단결정 실리콘과 다결정 실리콘의 기계적 물성을 알아보기 위해 CSM(Continuous stiffness measurement) 방식을 사용하는 나노 인덴터 (Nano Indenter XP)에 의해서 탄성계수와 경도 값을 측정하였다. 나노 인덴테이션의 결과 단결정 실리콘은 14.55Gpa 의 경도를 가지고 다결정 실리콘은 19.32Gpa 의 경도를 가진다. 다결정 실리콘의 기계적 강도가 높아서 연마 입자가 표면과 마멸 작용을 하여 표면을 연마하기가 단결정 실리콘보다 힘들다. 이는 대상 재료의 경도가 낮을수록 동일 하중에서 입자가 웨이퍼 표면으로 압입 되는 양이 증가하기 때문으로 생각된다.

Fig. 2 와 같이 단결정 실리콘과 다결정 실리콘 CMP 는 연마 압력과 헤드 및 테이블의 속도에 대해 연마제거율이 선형적인 관계를 보이고 있다. 이는 연마제거율(RR)이 압력(P)과 상대속도(V)에 비례한다는 Preston 방정식으로 설명될 수 있다. 압력이 큰 조건에서는 입자가 대상 표면에 활발하게 접촉하면서 높은 연마 제거율을 보인다.

Fig. 3 은 입자 농도에 따른 단결정 실리콘과 다결정 실리콘 연마 마찰력 신호이다. 단결정 실리콘의 마찰력 신호는 입자의 농도에 상관없이 모두 일정한 마찰력의 크기를 가진다. 하지만 다결정 실리콘의 경우 연마의 초기 부분에서는 짧은 천이구간이 발생하고 이후에는 평균 12kgf 의 마찰력으로 일정 유지되는 것을 볼 수 있다. 일정하게 마찰력의 신호가 유지되는 구간은 재료의 제거가 안정적으로 일어나는 곳이다. 입자 농도가 0wt%구간에서 연마 제거율은 거의 0Å/min 이었는데 이는 다결정 실리콘의 재료제거 과정이 불안정하여 연마가 거의 발생하지 않은 것으로 볼 수 있고, 마찰력 신호에서도 불안정한 연마 상태를 확인할 수 있다. 그리고 입자의 농도가 증가할수록 신호 초기의

Table.2 Surface roughness after CMP process

	Conditions	Single crystal silicon roughness	Poly-crystal silicon roughness
Abrasive concentration	0wt%	0.574nm	12.949nm
	3wt%	0.454nm	0.401nm
	5wt%	0.444nm	0.440nm
	10wt%	0.540nm	0.582nm
Pressure	100g/cm ²	0.514nm	1.616nm
	300g/cm ²	0.479nm	0.535nm
	500g/cm ²	0.454nm	0.401nm
	700g/cm ²	0.561nm	0.569nm
Velocity	30/30rpm	0.532nm	0.439nm
	60/60rpm	0.454nm	0.401nm
	90/90rpm	0.432nm	0.480nm
	120/120rpm	0.502nm	0.655nm

천이구간이 짧아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 다결정 실리콘의 결정 입계에 다결정 실리콘 증착과 풀링 (annealing)시에 고온에 의한 열 산화막이 생성된 것으로 파악된다. 입자의 농도가 높을수록 초기의 열 산화막 제거가 용이하여 안정적인 연마 상태로 빨리 도달하게 된다. CMP 공정에서는 단순히 마찰력으로 연마제거율을 설명할 수 없으며 대상재료의 경도나 탄성계수 등의 기계적 성질에 따라 재료의 제거 능률이 달라짐을 보여준다.

연마 압력과 속도에 따라 마찰력의 변화를 측정된 결과를 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었다. 마찰력의 값은 압력의 값에 비례한다는 것을 알 수 있고, 속도가 증가하는 경우 마찰력의 크기가 거의 동일한 것을 알 수 있다. 이는 속도의 증가에 의해 웨이퍼와 패드 면 사이에서 접촉 상태의 변화가 일어난다는 것을 예상할 수 있다. 속도가 증가하면 연마제거율이 증가하지만 마찰력은 거의 일정하므로 일반적인 윤활 이론에서 예측하는 바와 같이 슬러리에 의한 동압의 증가나 패드와 웨이퍼 사이의 한 점이 이동하는 거리 (sliding distance)가 길어짐을 알 수 있다[4].

Table. 2 는 연마 입자와 압력, 속도에 따른 표면 거칠기의 변화를 나타낸다. 입자의 농도가 증가하면 화학액에 의하여 약해진 표면을 많이 제거함으로써 표면 거칠기가 악화되는 것으로 고려된다. 압력과 속도에 따른 실험의 표면 거칠기를 살펴보면 단결정 실리콘과 다결정 실리콘 모두 압력이 가장 높거나 속도가 가장 빠른 경우에 표면거칠기가 가장 나쁜 것으로 알 수 있다.. 화학적인 제거 작용과 기계적인 제거작용이 서로 조화롭게 이루어지는 압력 500g/cm², 속도 60/60rpm 조건에서 가장 양호한 표면 거칠기를 보였다

4. 결론

본 연구에서는 반도체 메모리의 플로팅 게이트나 트랜지스터의 재료로 사용되는 다결정 실리콘의 재료제거 특성을 알아보기 위해 다결정 실리콘의 CMP 연마 제거율, 표면 거칠기 결과를 단결정 실리콘의 CMP 특성과 비교하였다. 연마제거율에 가장 중요한 역할을 하는 연마 입자의 농도가 증가할수록 연마제거율이 증가하고, 단결정 실리콘보다 상대적으로 높은 다결정 실리콘의 경도와 제조 시 생성된 열산화막의 영향으로 다결정 실리콘은 기계적 영향이 크게 작용하는 것으로 보인다. 동일한 슬러리에서 압력과 속도가 증가하게 되면 연마제거율은 증가하고 표면 거칠기는 악화되었다.

후기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터 사업(R15-2006-022-01001-0) 및 2009 년도 2 단계 두뇌한국 (BK)21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. 김형재 외. "CMP 공정에서 연마 결과에 영향을 미치는 패드 물성치에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 17, 3, 184-191, 2000
2. H. D. Jeong, H. J. Kim, S. H. Lee and D. Dornfeld, "Multi-Sensor Monitoring System in CMP for Correlations with Process Issues" Annals of the CIRP, 55, 1, 325-328, 2006
3. G. Ahmadi et al., "A Model for Mechanical Wear and Abrasive Particle Adhesion during the CMP process", J. of the Electrochem. Soc., 148(3), G99-G109, 2001
4. B. Bhushan, Principles and Applications of Tribology, New York, John Wiley & Sons, 1999