

이 글에서는 1G DRAM급 이상의 고집적 반도체 소자를 제조하기 위해 필수적인 표면 평탄화 방법으로 CMP(Chemical Mechanical Planarization) 공정을 소개한다. 특히 반도체 소자를 구성하는 재료의 화학적 반응과 기계적 마멸 정도에 적합한 연마(polishing) 처방을 제공하고자 한다.

아이자크 뉴턴은 “연마 입자의 크기가 작을수록 가공된 면의 스크래치는 감소하게 된다.”고 Opticks(1695) 지에 발표하였다. 즉, 산업혁명 이전에 이미 초정밀 경면연마에 대한 기본 메커니즘은 정립되었다고 볼 수 있다. 21세기에 들어서면서 연마기술은 나노테크놀로지를 구현하기 위한 한 도구로서 다양하게 적용되어 왔다. 특히 공학적으로 결함이 없는 경면을 얻고자 하는 응용에 가장 많이 활용되었으며, 요시카와(1967)는 가공단위에 따라 발생하는 응력장과 결함의 크기를 4영역으로 분류하였다. (그림 1)

즉, 결함이 없는 표면을 얻기 위해서는 분자 크기 이하의 가공단위에서 가능하며, 이는 순수한 기계적 에너지만으로는 실현될 수 없다. 그래서 열이나 화학반응을 결합한 기계 가공이 그 대안으로 발전되어 왔다. 그림 2는 가공에 의한 결함을 최소화하기 위한 화학기계적 연마(CMP: Chemical Mechanical Polishing)의 개념도를 나타낸다. 즉, 단단한 표면을 화학반응시키고, 결함

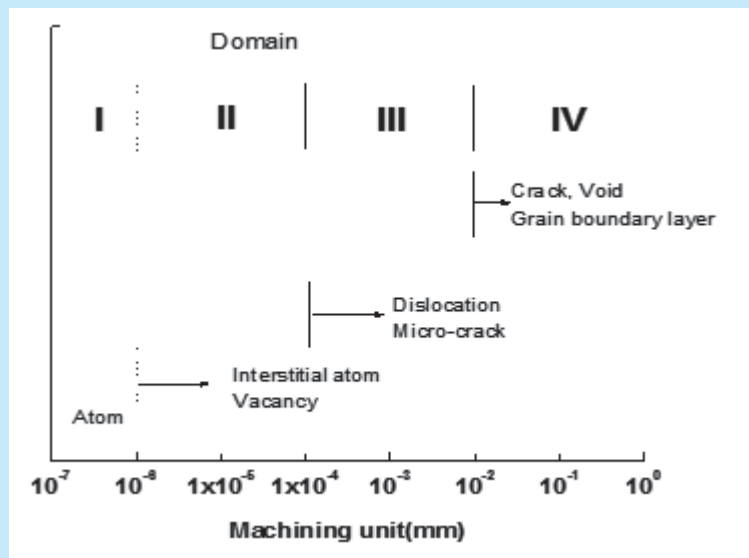


그림 1 가공단위와 가공 결함의 관계(Yoshikawa, 1967)

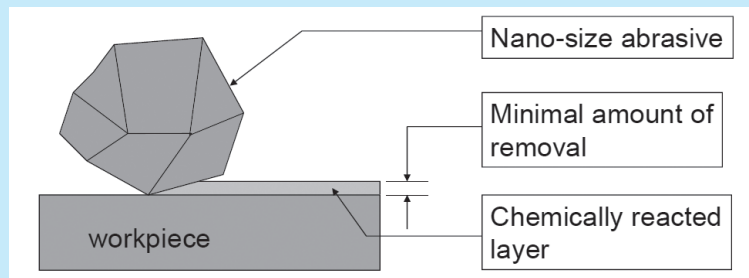


그림 2 가공결함을 최소화하기 위한 화학 기계적 연마의 개념도

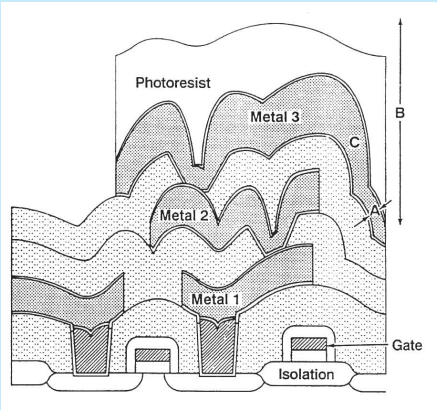


그림 3 집적소자의 다층 배선공정 ; 평탄화의 효과(IBM)(좌/우 ; 평탄화 미적용/적용)

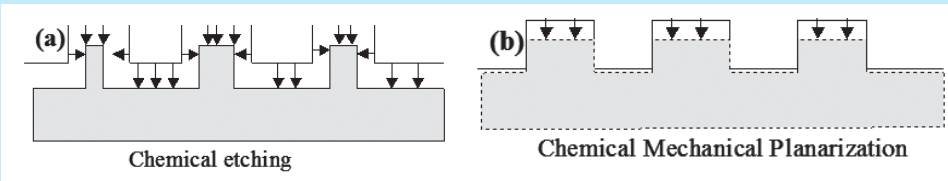
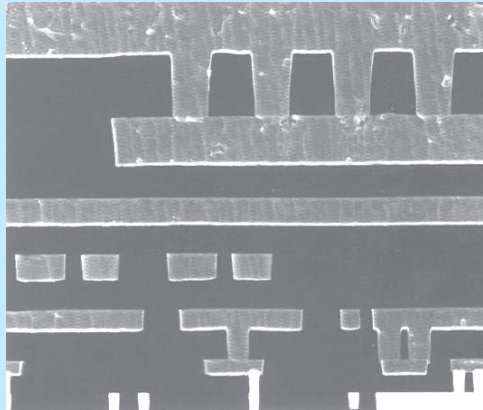


그림 4 화학반응에 의한 등방적 제거(a)와 화학 기계적 평탄화(b)의 메커니즘 차이

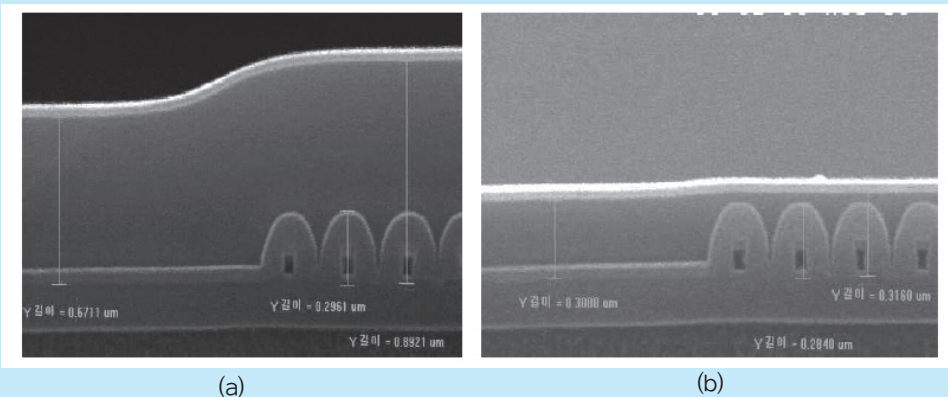


그림 5 절연막(SiO₂)의 평탄화 전(a)과 후(b)

력이 약해진 반응층을 나노미터 크기의 연마 입자로 제거함으로써 무결함 경면을 얻을 수 있다는 것이다.

반도체 표면 평탄화를 위한 CMP

1980년대 말, 미국 IBM에서는 서브마이크론 이하의 선폭과 다층 배선을 갖는 초집적 반도체를 얻기 위해서

는 소자 표면의 평탄화(planarization)가 필수적이며, 이를 실현하기 위한 강력한 방법으로서 화학 기계적 연마(CMP)를 적용한 것이 시초이며, 지금 10nm급의 디바이스를 얻기 위한 핵심공정이 되었다. CMP는 박막형성, 로광 및 식각을 통해 형성된 패턴의 상부에 연속적으로 패턴을 만들기 위해서 하부 패턴 표면을 평탄화시키는 것이다. 그림 3은 평탄화 여부에 따라 형성된 소자의 단면 구조의 차이를 보여주고 있다. 완성된 소자의 미세화와 다층화를 위해서는 평탄화공정의 도입은 절대적임을 알 수 있다.

평탄화의 메커니즘은 화학적 및 기계적 에너지의 하이브리드 작용에 의한 이방적(anisotropic) 재료 제거이다. 즉, 소자의 돌출부에 압력이 집중되고 기계적 접촉이 선택

적으로 일어나 돌출부를 우선적으로 제거하여 평탄화시킨다는 것이다. 그림 4는 일반적으로 반도체 공정에 주로 적용되고 있는 화학반응에 의한 등방적 제거와 CMP의 차이점을 설명하고 있다.

평탄화는 그림 5에서 보여주듯이 절연막(SiO₂) CMP부터 적용되기 시작했고 현재 가장 많이 응용되고 있다. CVD에 의해 패턴 위에 일정한 두께로 증착

된 절연막은 단차가 발생하게 되고, 이것은 로광공정에서 초점심도(DOF)에서 벗어나게 되어 절연막 표면에 일정한 선폭을 형성할 수 없게 된다. 이에 오른쪽과 같이 평탄화를 통해 단차를 없애 줌으로써 안정된 연속공정이 가능하게 되는 것이다.

CMP는 절연막 평탄화 외에도 소자 분리(STI: Shallow Trench Isolation), 텅스텐과 같은 층간 수직 배선 및 구리배선에 이르기까지 최근 30년간 그 적용 범위를 점차 확대해 왔다. 특히 최근에는 다양한 소자의 3차원 집적을 위한 TSV(Through Silicon Via) 공정에 이르기까지 현대 및 미래의 반도체 집적화를 위한 핵심 양산공정으로서 그 중요도를 더해 가고 있다.

CMP 관점에서 분류한 전자재료

CMP는 화학 및 기계적 에너지에 의한 하이브리드 제거가공이다. 그러나 같은 화학 및 기계적 에너지를 적용하여도, 모든 재료가 같은 반응을 일으키는 것은 아니다. 마치 병에 대한 환자의 반응이 각각 다르게 나타나는 사상의학과 같은 이치이다. 그래서 주로 반도체 소자를 구성하는 재료에 대하여 CMP를 적용할 때, 해당 재료가 화학반응하기 쉽거나 혹은 어려운가에 따라 ETR(Easy To React)과 DTR(Difficult To React) 그리고 기계적 마멸이 쉽거나 혹은 어려운가에 따라 ETA(Easy To Abrade)와 DTA(Difficult To Abrade)로 구분할 수 있다. 표 1은 이러한 화학반응 및 기계적 마멸정도의 조합에 따라 전자재료를 네 가지 유형으로 구분한 것이다.

그림 6은 화학반응과 기계적 마멸 정도의 조합에 따라 전자재료를 분류한 것이다. CMP 첫째로 ETA-ETR재료는 구리, 알루미늄 및 텅스텐과 같은 금속 배선재료이다. 즉 연마 슬러리에 의해 쉽게 화학반응을 하고 콜로이드 실리카에 의해 제거될 수 있다. 둘째는 DTA-ETR재료로서 산화막(SiO₂) 절연재료이다. 스크래치가 일어나기 힘들지만 알칼리 수용액 내에서

표 1 전자재료의 CMP를 위한 화학 기계적 균형

Group	Sub-Group	Balance	
		Chemical Reaction	Mechanical Abrasion
ETR	ETA-ETR	●	○
	DTA-ETR	●	◐
DTR	ETA-DTR	◐	●
	DTA-DTR	○	●

●: Strong, ◐: Medium, ○: Weak

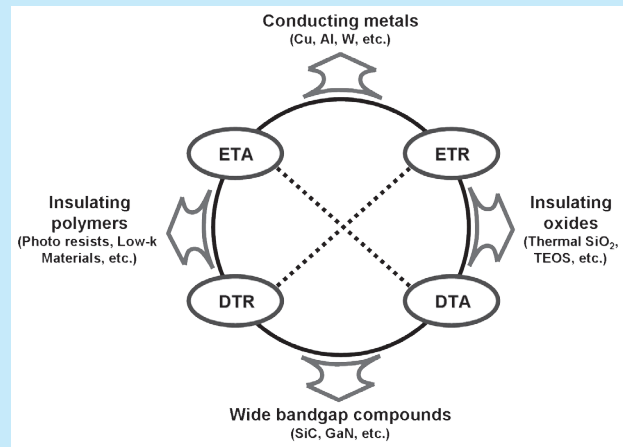


그림 6 화학반응과 기계적 마멸 정도의 조합에 따른 전자재료의 분류

는 쉽게 수화된다. 셋째는 ETA-DTR재료로서 MEMS나 집적회로에 사용되는 SU-8과 같은 고분자 절연재료이며, 경도는 낮으나 화학적으로 매우 안정된 재료이다. 마지막으로 DTA-DTR재료는 높은 경도와 화학적 안정성을 확보한 SiC, GaN와 같은 화합물 반도체 재료이다.

화학 기계적 균형에 근거한 CMP 재료 제거

CMP에 의한 재료제거는 화학 기계적 하이브리드 작용에 의해 일어난다. 즉, 슬러리의 화학성분과 재료 표면간의 화학반응에 의해 생성된 층이 연마입자의 미끄럼 및 구름운동에 의해 쉽게 제거되는 것이다. 이 재료 제거 메커니즘은 연속적으로 발생한다. 그림 7은 화학 기계적 균형에 근거한 CMP 재료제거 메커니즘을 나타낸다. 화학적 식각, 산화 및 수화의 정도가 심하면 전자

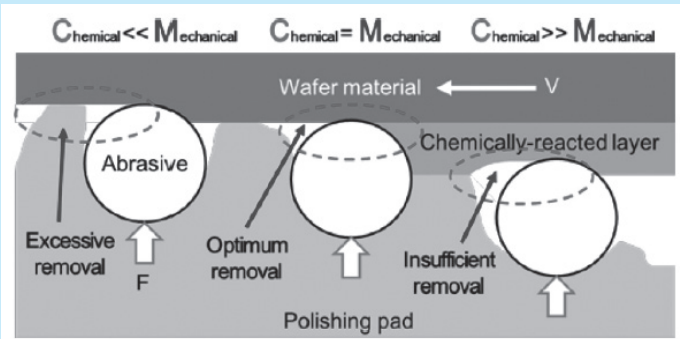


그림 7 화학 기계적 균형에 근거한 CMP 재료 제거 메커니즘

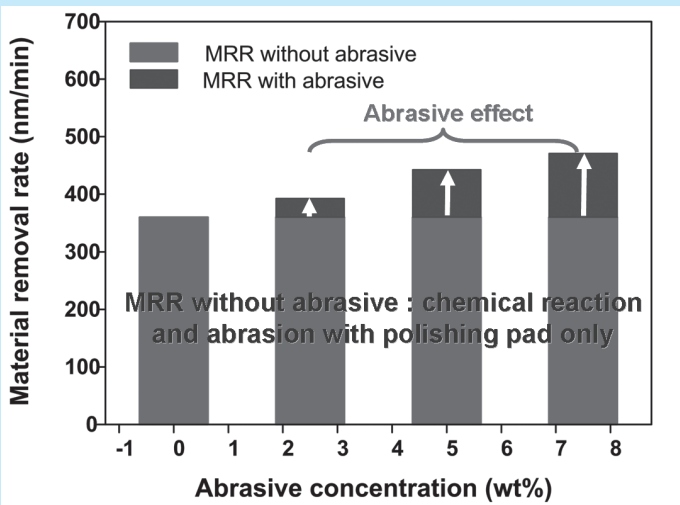


그림 8 구리 CMP 슬러리 내의 연마입자 농도가 재료 제거율에 미치는 영향

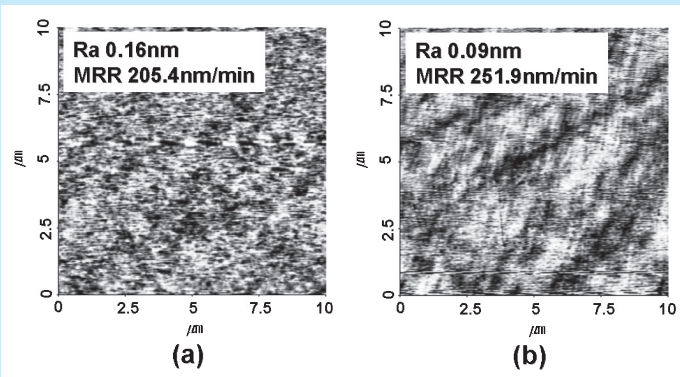


그림 9 실리카(a)와 세리아(b) 슬러리에 의한 산화막 CMP한 후의 AFM 이미지와 재료 제거율

재료 표면은 거칠어진다. 연마입자가 크거나 압력이 높으면 재료 표면은 스크래치가 많이 발생한다. 따라서 해당하는 재료를 CMP하려면 이에 적합한 화학 및 기계적 에너지를 공급해야 하므로 적합한 처방전이 필요한 셈이다.

구리나 알루미늄과 같은 배선재료는 CMP 슬러리에 많이 이용되는 콜로이달 실리카보다 경도가 낮다. 따라서 연마중 콜로이달 실리카는 쉽게 금속 표면에 스크래치를 남기게 된다. 따라서 슬러리 내의 산화제가 금속 표면을 부동태화(passivation)시키고 이를 콜로이달 실리카로 제거하고 다시 부동태화로 이어지는 반복 과정에 의해 안정적인 CMP가 유지된다. 그림 8은 구리 CMP 슬러리 내의 연마입자 농도(집중도)가 재료제거율(material removal rate)에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 연마입자가 없는 슬러리에서는 매우 낮은 제거율을 나타낸다. 그러나 입자의 농도가 증가함에 따라 재료제거율도 증가하며, 화학반응층을 평탄화시켜 표면거칠기도 향상됨을 알 수 있다.

SiO₂와 같은 산화막 CMP의 1차 제거 메커니즘은 연마중 발생하는 마찰력에 의해 산화막이 고온에서 약해져 미소 파괴되거나 소성변형되는 것이다. 이어서 알칼리 수용액에 의해 수화되어 부드러워진 산화막은 연마입자에 제거된다(plow). 산화막 CMP에 가장 널리 이용되는 연마입자는 실리카(SiO₂)와 세리아(CeO₂)이다. 실리카 입자는 산화막 상부의 수화층(Si(OH)₄)에 침투하여 제거한다. 세리아 입자는 수화층과 Ce-O-Si(OH)₄ 결합을 유도하여 보다 효과적으로 제거하게 된다. 결과적으로 그림 9와 같이 세리아 입자는 실리카 입자보다 산화막의 제거율을 향상시키나, 부분적으로 스크래치를 유발한다. 따라서 경도가 낮은 연마입자를 이용하여 부드럽게 제거할 필요가 있다.