

연마제 특성에 따른 차세대 금속배선용 Al CMP (chemical mechanical planarization) 슬러리 평가

차남구 · 강영재 · 김인권 · 김규채 · 박진구[†]

한양대학교 재료화학공학과

Evaluation of Al CMP Slurry based on Abrasives for Next Generation Metal Line Fabrication

Nam-Goo Cha, Young-Jae Kang, In-Kwon Kim, Kyu-Chae Kim and Jin-Goo Park[†]

Division of Materials and Chemical Engineering, Hanyang University, Ansan, 426-791, Korea

(2006년 10월 31일 받음, 2006년 11월 27일 최종수정본 받음)

Abstract It is seriously considered using Al CMP (chemical mechanical planarization) process for the next generation 45 nm Al wiring process. Al CMP is known that it has a possibility of reducing process time and steps comparing with conventional RIE (reactive ion etching) method. Also, it is more cost effective than Cu CMP and better electrical conductivity than W via process. In this study, we investigated 4 different kinds of slurries based on abrasives for reducing scratches which contributed to make defects in Al CMP. The abrasives used in this experiment were alumina, fumed silica, alkaline colloidal silica, and acidic colloidal silica. Al CMP process was conducted as functions of abrasive contents, H_3PO_4 contents and pressures to find out the optimized parameters and conditions. Al removal rates were slowed over 2 wt% of slurry contents in all types of slurries. The removal rates of alumina and fumed silica slurries were increased by phosphoric acid but acidic colloidal slurry was slightly increased at 2 vol% and soon decreased. The excessive addition of phosphoric acid affected the particle size distributions and increased scratches. Polishing pressure increased not only the removal rate but also the surface scratches. Acidic colloidal silica slurry showed the highest removal rate and the lowest roughness values among the 4 different slurry types.

Keywords Al (aluminum), Chemical mechanical planarization (CMP), Metallization, Acidic colloidal slurry.

1. 서 론

구리(Cu; copper) 배선과 비교하여 알루미늄(Al; aluminum) 배선의 장점은 기존 장비를 이용할 수 있고 비용이 절감되며 양산성이 우수하다는 점이 있다. 또한 텅스텐(W; tungsten) 플러그에 비해 전기 저항성이 낮고 동일 물질로 배선과 미아(via)를 형성할 수 있는 장점이 있다.^{1,2)} 최근에는 Al 배선을 45 nm 이하의 구조물에도 적용하는 시도가 계속 진행되고 있다.³⁾ 현재 DRAM(dynamic random access memory)에서는 금속배선 재료로 Al, Al 합금(aluminum alloy), Ti (titanium), TiN (titanium nitride), TiW (titanium tungsten) 등이 사용되고 있다. Al 자체는 금속배선으로 쓰이고 Ti, TiN, TiW 등은 Al과 실리콘에서 발생하는 현상(일명 "spiking")을 방지하기 위한 확산 방지막으로 사용된다. Al은 electromigration 저항성을 높이기 위하여 종종 구리나 실리콘을 함유하는 합

금으로 제조되어 사용된다.⁴⁾

LSI (large scale integration) 기술의 초기에는 습식 식각 방법으로 Al을 패터닝하였다. 이러한 방법은 등방성(isotropic) 식각으로 이 방법은 이방성(anisotropic) 식각 방법인 RIE (reactive ion etching) 방법으로 빠르게 전환되었다. RIE 공정의 특징은 Al 박막이 패터닝된 포토레지스트에 의해 덮인 후 건식식각 공정을 통해 덮이지 않은 부분이 플라즈마 안에 형성된 반응성 이온과 레티컬에 의해 제거되게 된다. 기본적인 Al RIE 공정은 크게 3가지 단계로 나눌 수 있다. 첫번째 단계는 자연적으로 형성된 Al_2O_3 층과 잔류되어 있는 수분을 제거하는 것이다. 이 기초 단계를 거치면 금속 자체를 건식 에칭으로 제거하는 단계로 들어간다. 오버에치 단계에서는 조개진 틈 사이에 잔류하는 금속을 제거하는 공정이 수행된다.⁵⁾

이러한 RIE 공정을 대체하는 새로운 방법으로 CMP (chemical mechanical planarization) 방법이 시도되고 있다. 이러한 CMP 공정을 이용하게 되면 전형적인 RIE

[†]E-Mail : jgpark@hanyang.ac.kr

문제점인 포토레지스트의 선택성 한계, 프로파일 조절 능력의 부족, 내부 산화, electromigration에 의한 배선단락 등의 문제점을 극복할 수 있다.⁶⁾ 또한 광역 평탄화를 통해 좁은 면적에서 다층 구조를 형성하기에 최적의 조건을 제공할 수 있다.⁷⁾ 반면에 표면부식, 좁은 구조물내의 Al 증착, Al과 같은 부드러운 금속의 스크래치와 같은 연마불량 등의 문제점이 생길 수 있다. 표면 부식문제는 이온수를 이용하여 해결할 수 있으며⁸⁾ 좁은 구조물내의 Al 증착공정은 Al CVD (chemical vapor deposition) 공법과 PVD (physical vapor deposition) 공법을 결합하여 해결할 수 있다.⁹⁾ 또한 부드럽고 약한 금속의 연마특성은 CMP 공정과 슬러리 특성을 변화시켜 우수한 조도의 표면을 얻는 것이 가능하다.^{10,11)}

CMP 공정은 회전하는 웨이퍼 케리어에 웨이퍼를 고정시킨 후 폴리싱 패드가 부착되어 있는 회전하는 테이블에 가압되어 상하의 연마 운동에 의해 연마되는 공정을 말한다. 연마 공정은 폴리싱 패드에 주입되는 슬러리를 통해 화학적인 영향을 받게 된다. 슬러리는 아주 작은 연마입자가 안정하게 분산되어 있는 용액으로 연마 공정을 진행시키는 주요 인자로 작용한다. 슬러리에 포함되는 화학용액은 선택성을 지니며 선택된 재료를 제외한다 다른 기본 물질에 대해서는 작용하지 않기 때문에 선택적인 연마가 가능하게 된다.¹²⁾ 원래 CMP 공정은 산화막과 같은 유전체를 평탄화하기 위해 개발되었다. 그 후 최근에는 다층 금속막의 평탄화 공정에 도입되었고 Cu 및 W에 적용되어 차세대 배선공정의 핵심기술로 자리 잡고 있다. 특히 듀얼다마신(DD; dual damascene) 공정은 비아와 배선을 동시에 형성하는 기술이다.³⁾ Fig. 1은 듀얼다마신 공정을 이용하여 형성된 이상적인 Al 다단 배선과 비아의 구조를 나타내고 있다. 듀얼다마신의 경

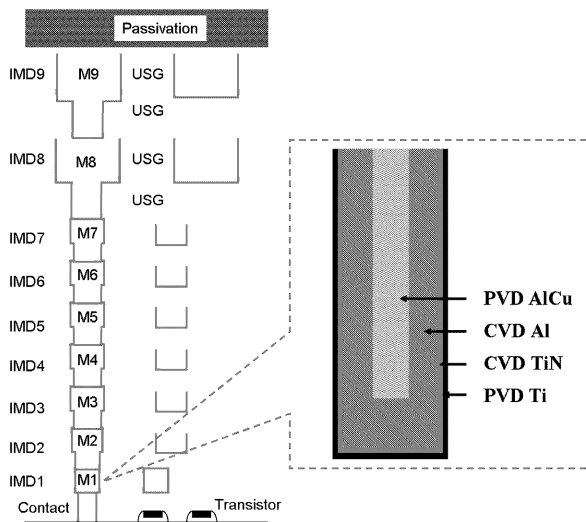


Fig. 1. Schematic illustration showing an ideal multi-level interconnect architecture and Al via structure.

우 RIE 보다 6단계 더 적은 공정수를 가지고 있으므로 이를 이용할 경우 256M DRAM제작에서 모듈당 가격은 약 13%를 줄이고 모듈 제작 공정 시간은 약 18% 정도 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.¹³⁾

본 논문에서는 Al CMP 공정 시 가장 중요한 슬러리 내 연마입자에 대해 알아보고 각 연마입자를 이용하여 슬러리를 제조한 후 이를 이용하여 Al에 대한 연마특성을 알아보았다.

2. 실험 방법

2.1. 슬러리 구성(Slurry formation)

CMP 공정에서 제일 중요한 슬러리는 각 문헌을 근거로 준비되었다. 일반적으로 슬러리의 구성은 연마제 (abrasive particles), 분산제(dispersing agent), 착화제 (complexing agent), 산화제 (oxidant), 부식 방지제 (corrosion inhibitor), pH 조절제 (pH adjustors) 등으로 구성되어 있으며 이를 초순수에 혼합하여 사용한다.^{14,15)} Fig. 2는 CMP 공정 개략도를 보여주고 있다.

본 실험에 사용된 슬러리는 크게 4가지로 나누어 준비되었다. 연마제의 원료는 알루미나(γ -Alumina, Degussa, 99.99%, primary size~13 nm), 폼드 실리카(Fumed silica, Degussa, 99.99%, primary size~30 nm), 염기성 콜로이드 실리카(Alkaline colloidal silica, ACESOL, 120 nm, pH 10.5, 30 wt%, ACE High-Tech, Korea) 및 산성 콜로이드 실리카 슬러리(Acidic colloidal silica, 50 nm, pH 2.1, 10 wt%, ACESOL, ACE High-Tech, Korea)가 사용되었다.

산화제로는 과수(hydrogen peroxide (H_2O_2), Dong-Woo Fine. Co., 30 wt%)가 첨가되었다. 염기성 콜로이드 실리카를 제외하고 산성 적정제로 인산(phosphoric acid (H_3PO_4), Dong-Woo Fine. Co., 50 wt%)이 사용되었다. 알루미나와 폼드 실리카 분산 안정제로 citric acid ($C_6H_8O_7$, Sigma-

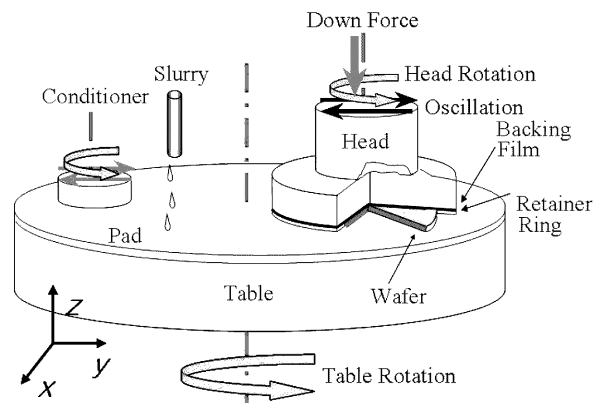


Fig. 2. Schematic illustration of CMP equipment.

Table 1. Comparison of process steps for the RIE and the Dual Damascene sequence.

step	RIE process	Dual Damascene process
1	Oxide (USG) deposition	Oxide (USG) deposition
2	Lithography contact hole	Lithography contact hole
3	Contact hole etch	Contact hole etch
4	Photoresist strip	Photoresist strip
5	Ti/TiN deposition	Lithography metal 1
6	Tungsten deposition	Oxide etch for metal 1
7	Tungsten CMP	Photoresist strip
8	Metal 1 deposition	Hot aluminum deposition (metal 1)
9	Lithography metal 1	Metal 1 CMP
10	Metal 1 RIE	Oxide (USG) deposition
11	Photoresist strip	
12	Anneal	
13	Oxide (DPSG) deposition	
14	Oxide CMP	
15	Densification anneal	
16	Oxide (USG) deposition	

Aldrich, USA)가 사용되었다. 실험에 사용된 초순수는 18.2 MΩ·cm으로 자체 제작한 초순수 제조기를 통해 제조되었다.

각각 슬러리에 맞는 연마제와 첨가제는 초순수에 적절 한 비율로 혼합된 후 전기 믹서기를 이용하여 혼합되었다. 실험의 안정성을 위하여 제조된 슬러리는 제조 후 1시간 이내에 사용되었다. Table 2는 실험에 사용된 연마제의 물리적 특성을 보여주고 있다. Table 3은 실험

에 사용된 슬러리의 이름과 각 조성을 정리해 나타내고 있다. 슬러리 제작 후 파티클 사이즈는 파티클 사이즈 분석기(LEZA 600, Otsuka Electronics Co., Japan)를 이용하였다.

2.2. CMP 장비 구성

AI CMP 실험을 수행하기 위한 장비로 Poli500 (G&P Tech, Korea) CMP polisher가 사용되었다. 본 실험에 사용된 패드(Pad)는 IC1400 (Rohm & Haas, USA)이 사용되었다. 공동 실험 조건으로 슬러리의 유량 150 ml/min, 헤드(Head) 속도 50 rpm, 플레이트(Platen) 속도 50 rpm에서 oscillation 모드로 실험을 수행하였다. CMP 실험은 연마제 함유량, 인산농도, 공정 압력을 변화시켜 가면서 AI 박막의 RR (removal rate)과 표면 변화를 알아 보았다. 패드 컨디셔닝(Pad conditioning)은 ex-situ 방법으로 각 실험을 수행한 후 새로운 실험을 수행하기 전에 6인치 다이아몬드 컨디셔너(conditioner, Sacsol Diamond, Korea)를 사용하여 1분 동안 수행하였다.

2.3. RR (removal rate) 측정

먼저 AI CMP 공정을 확립하기 위하여 4인치 bulk AI 웨이퍼가 제작되었다. 2 mm 두께의 Al판 (A6061, Sungjin, Korea)을 워터젯 방법으로 절단하여 웨이퍼 형태로 가공하여 AI 웨이퍼를 제작하였다. RR 측정은 아래의 수식을 이용하여 CMP 실험 전후의 무게를 측정하여 계산되었다.

$$T = \frac{W_{before} - W_{after}}{d \times A} \tag{1}$$

여기서 T는 제거된 두께(removal thickness), W_{before} 와 W_{after} 는 연마 전후 샘플의 무게 변화, d는 샘플의 밀

Table 2. Physical properties of various abrasive particles.

	γ-Alumina	Fumed silica	Alkaline colloidal silica	Acidic colloidal silica
Primary particle size (nm)	13	30	120	50
Density (g/cm ³)	~3.2	2.2	~1.3	~1.3
pH values	4.5~5.5	3.6~4.5	10.5	2.1

Table 3. Components of various test slurry.

Slurry	Abrasive particle	pH adjuster	Dispersing agent	Oxidant
Alumina	0.5~5 wt% γ-Al ₂ O ₃	5~50 vol% H ₃ PO ₄	0.5 M C ₆ H ₈ O ₇	2.5 vol% H ₂ O ₂
Fumed silica	0.5~5 wt% F-SiO ₂	5~50 vol% H ₃ PO ₄	0.5 M C ₆ H ₈ O ₇	2.5 vol% H ₂ O ₂
Alkaline colloidal silica	0.5~5 wt% C-SiO ₂	-	-	2.5 vol% H ₂ O ₂
Acidic colloidal silica	0.5~5 wt% C-SiO ₂	5~50 vol% H ₃ PO ₄	-	2.5 vol% H ₂ O ₂

도, A는 샘플의 면적을 나타낸다. 샘플 무게의 측정은 0.1 mg까지 측정 가능한 전자저울 (AY220, Shimadzu, Japan)을 이용하였으며 제거율은 1분을 기준으로 표시하였다. bulk Al의 밀도는 2.7 g/cm^3 을 사용하였다.

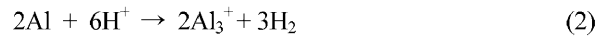
CMP공정 수행 후 bulk Al의 표면은 비접촉 방식의 레이저 프로파일러 ($\mu\text{Surf-C}$, Nanofocus, Austria)를 사용하여 3차원으로 측정된 후 내장 소프트웨어를 이용하여 표면 거칠기(Ra; average roughness)가 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

Al-H₂O의 상온 25°C Eh-pH 도표¹⁶⁾에서 확인할 수 있듯이 Al은 산성과 염기성 모두에서 이온 상태로 존재할 수 있다. pH 4~8 영역에서 알루미늄은 표면에 치밀하고 단단한 Al₂O₃막을 형성하고 있으므로 중성 영역에서 CMP 공정을 수행할 경우 기계적인 효과에 의한 연마를 수행할 뿐이지 화학적인 효과는 기대할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 pH 조절제로 인산을 사용하여 슬러리의 pH를 산성으로 조절하였다. 인산의 경우 약산이지만, 첨가하는 양에 따라 충분히 pH를 낮출 수 있다.³⁾ 식 (2)

는 산성에서 Al이 녹아 나오는 경우를, 식 (3)은 염기성에서 Al이 녹아 나오는 경우를 나타내고 있다. 식 (4)는 인산을 사용하여 Al을 에칭 시키는 메커니즘을 설명하고 있다. 알루미늄은 3개의 전자를 내놓고 인산과 결합하여 AlPO₄를 형성하고 알루미늄은 인산과 반응하여 물을 내놓게 된다.

Acidic (H⁺) attack



Alkali (OH⁻) attack



H₃PO₄ attack

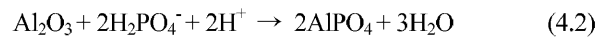
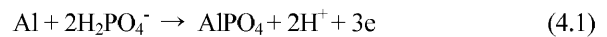


Table 3에 정리되어 있는 각 슬러리를 사용하여 bulk Al 웨이퍼의 공정별 Al의 연마율 (RR)을 측정해 보았다. 알루미늄 연마제는 2 wt%를 기점으로 증가한 후 일정한 값을 나타내었다(Fig. 3(a)). 알루미늄 슬러리를 이용한 실험결과 Al은 인산의 농도가 높일수록 연마율이 증가하

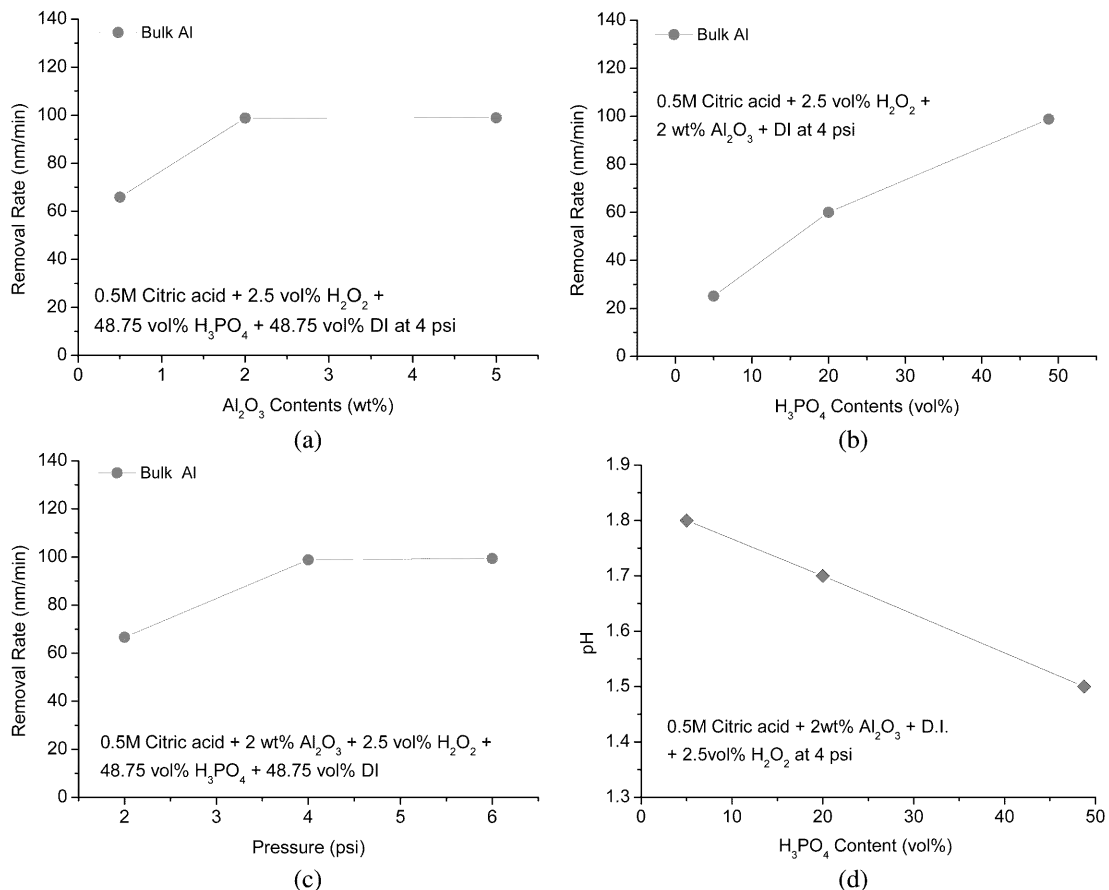


Fig. 3. Removal rates of bulk Al as functions of (a) Al₂O₃ slurry contents, (b) H₃PO₄ contents, and (c) head pressure. (d) Changes of pH as a function of H₃PO₄ contents.

는 경향을 나타내었다(Fig. 3(b)). 연마압력을 증가시킬수록 Al의 연마율은 증가 하였으나 연마압력이 약 4 psi 이상인 경우엔 연마율이 거의 증가하지 않았다(Fig. 3(c)). 연마 압력이 높아질수록 표면에 스크래치가 많이 발생하는 것을 육안으로 확인할 수 있었다. 인산을 증가시킬수록 슬러리의 pH는 점차 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 3(d)).

폼드 실리카를 이용한 실험결과 알루미늄 슬러리와 비슷한 경향의 실험결과를 얻을 수 있었다. 폼드 실리카 연마제도 2 wt%를 기점으로 증가한 후 이후 약간 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 4(a)). 인산을 증가시킬수록 연마율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4(b)). 연마압력을 증가시킬수록 Al의 연마율이 증가하는 경향을 보였으나 연마 압력이 높아질수록 표면에 스크래치가 많이 발생하는 것을 육안으로 확인할 수 있었다(Fig. 4(c)). 알루미늄 슬러리와 동일하게 인산을 증가시킬수록 슬러리의 pH는 점차 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 4(d)). 폼드 실리카의 경우 알루미늄을 사용한 슬러리 보다 낮

은 연마율을 나타내었다.

염기성 콜로이드 실리카 슬러리를 이용할 경우엔 인산과 같은 첨가제 없이도 알루미늄 슬러리와 유사한 연마율을 얻을 수 있었다(Fig. 5(a)). 첨가제 없이 압력에 따른 CMP 공정을 수행한 결과 압력에 비례하여 연마율이 증가하는 것을 얻을 수 있었다(Fig. 5(b)). CMP 공정 후 연마 표면도 앞에 실험결과보다 우수한 표면 조도 결과를 얻을 수 있었다.

산성 콜로이드 실리카 슬러리를 이용한 연마 실험 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 슬러리 함량은 다른 실험과 동일하게 2 wt%까지는 빠르게 증가하다가 그 후 증가율이 감소하는 형태를 보였다(Fig. 6(a)). 인산 첨가의 경우 약 2 vol% 에서 가장 높은 연마율을 보인 후 다시 감소하는 형태를 나타내었다(Fig. 6(b)). 연마압력에 대해서는 압력이 높아질수록 연마율이 증가하였다(Fig. 6(c)). 알루미늄과 폼드 실리카의 경우 인산의 농도가 높으면 비례적으로 연마율이 증가하였으나 산성 콜로이드 실리카의 경우 증가하다 감소하는 경향을 나타내었다. 이를 알

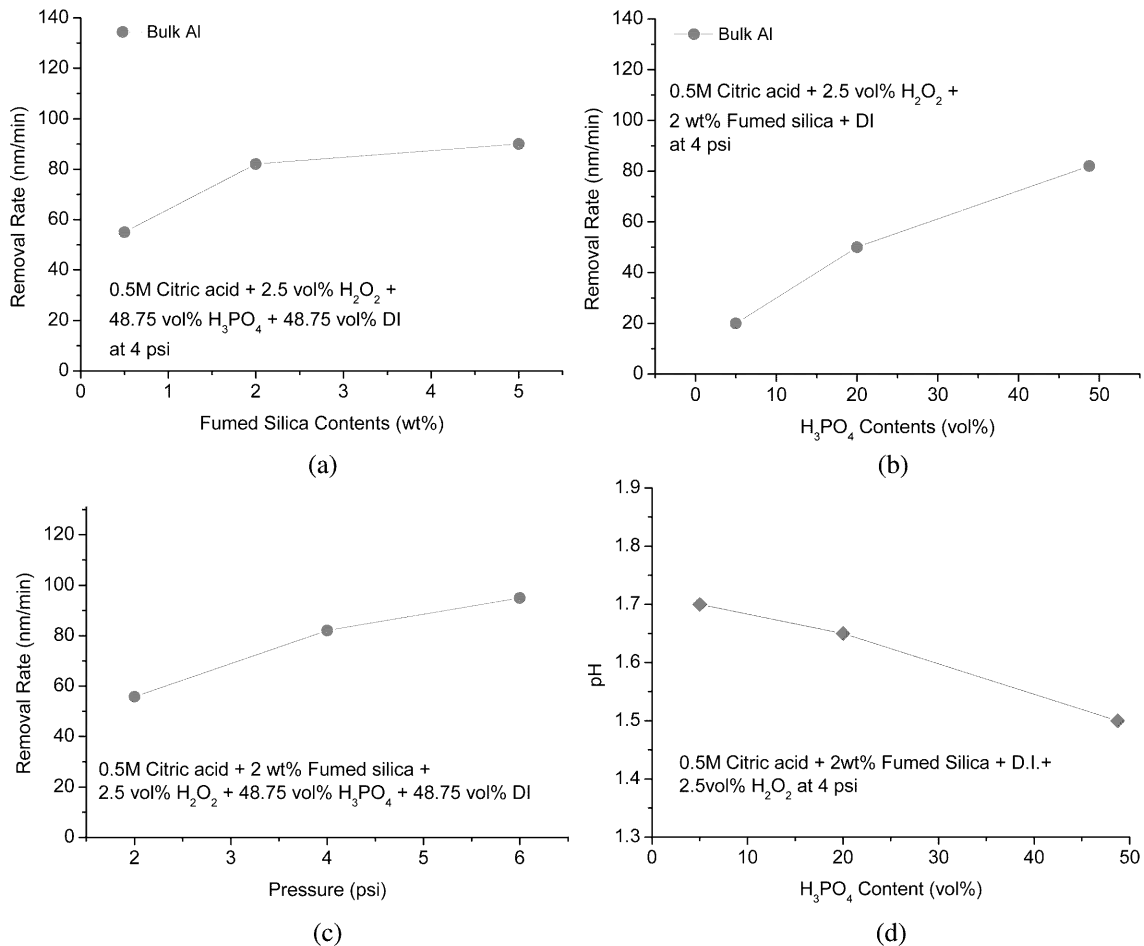


Fig. 4. Removal rates of bulk Al as functions of (a) fumed silica slurry contents, (b) H₃PO₄ contents, and (c) head pressure. (d) Changes of pH as a function of H₃PO₄ contents.

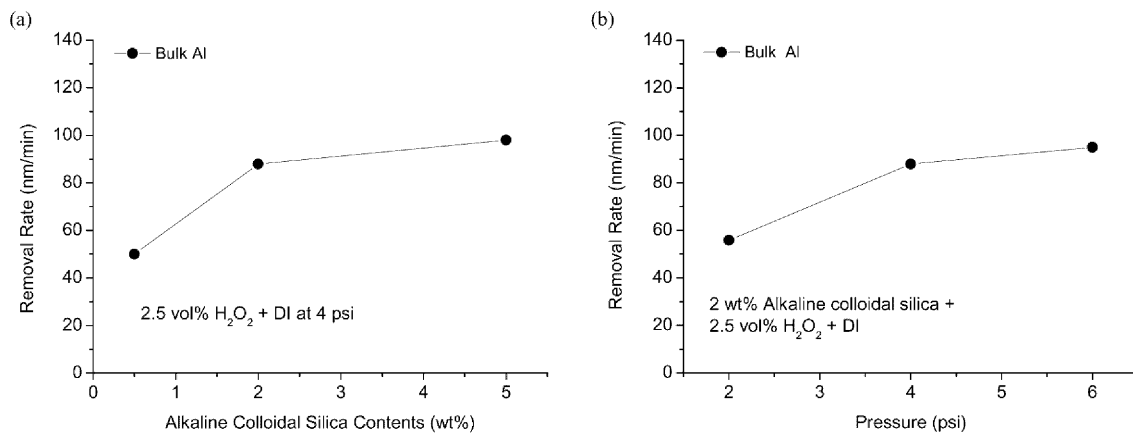


Fig. 5. Removal rates of bulk Al as functions of (a) alkaline colloidal silica slurry contents and (b) head pressure.

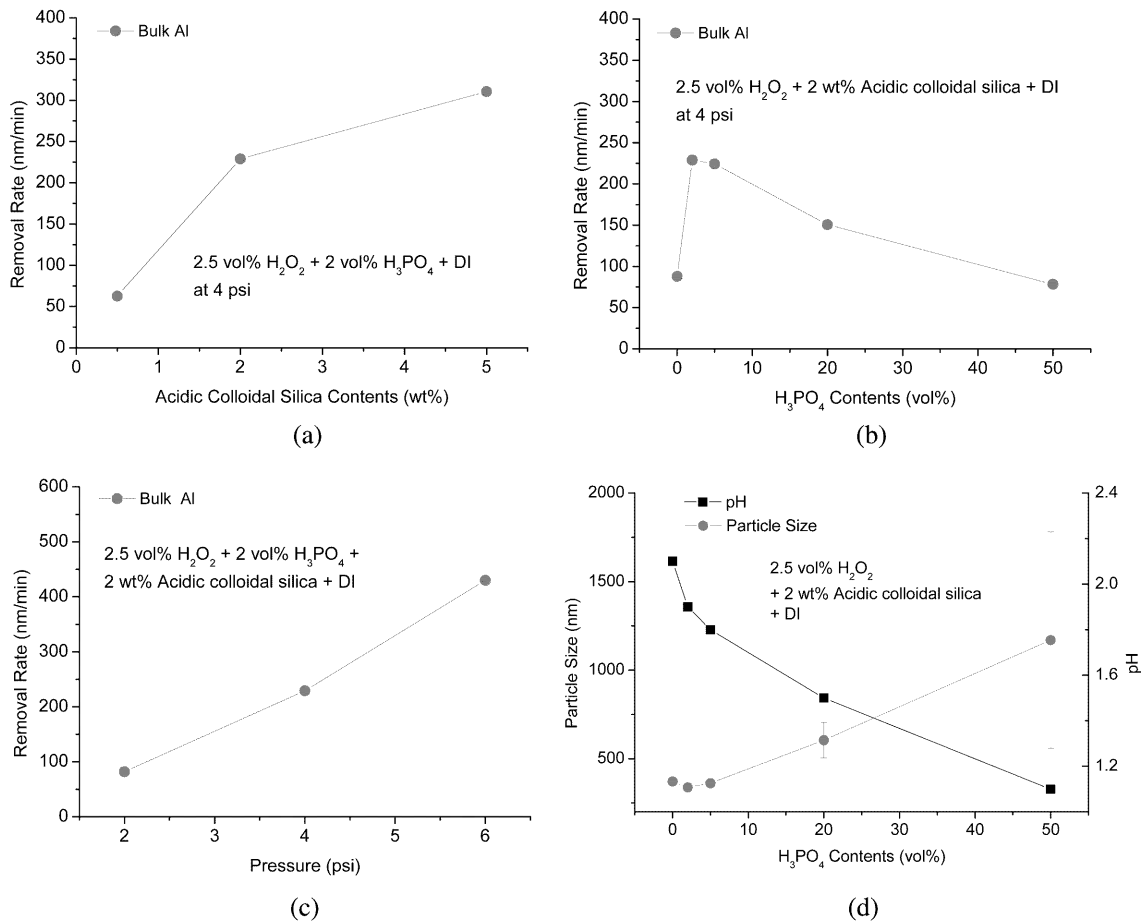


Fig. 6. Removal rates of bulk Al as functions of (a) acidic colloidal silica slurry contents, (b) H₃PO₄ contents, and (c) head pressure. (d) Changes of particle size and pH as a function of H₃PO₄ contents.

아보기 위하여 산성 콜로이드 슬러리의 파티클 사이즈를 측정해 보았다(Fig. 6(d)). 측정결과 과도한 양의 인산은 슬러리 내의 연마입자의 평균 입자 크기를 크게 증가시

키는 것으로 분석되었다. 연마입자의 거대화는 CMP 공정 중 슬러리 유동성을 나쁘게 하고 표면에 심각한 스크래치를 남기는 원인으로 생각된다.

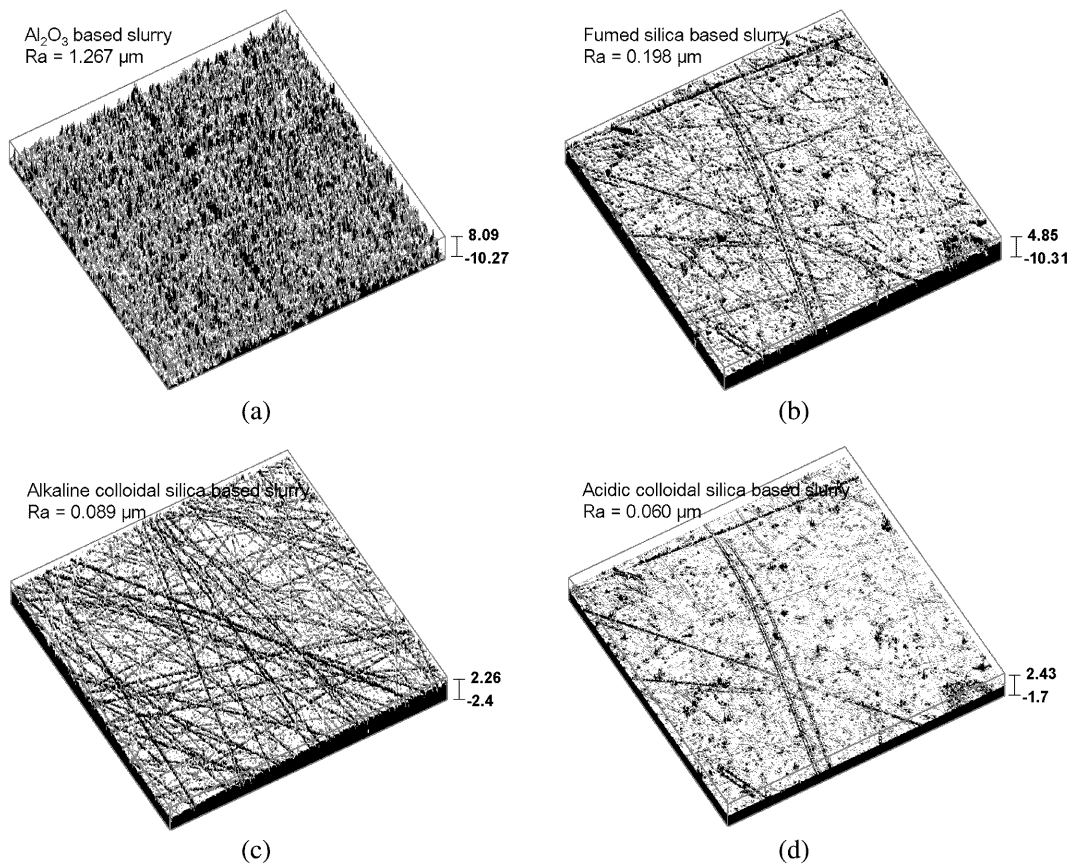


Fig. 7. Non-contact 3D profiling results after CMP process with (a) Al_2O_3 , (b) fumed silica, (c) alkaline colloidal silica, and (d) acidic colloidal silica base slurry (Ra: average roughness).

실제 bulk Al 연마 후 연마제 특성에 따른 표면 거칠기 정도를 비접촉식 레이저 프로파일러를 이용하여 측정해 보았다(Fig. 7). 표면 거칠기는 측정기에 포함된 소프트웨어를 이용하여 계산되었다. 측정범위는 $772 \times 800 \mu\text{m}$ 였으며 동일한 변수에서 결과값을 산출하였다. 측정 결과 육안으로 확인한 CMP 실험 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 알루미나를 사용한 경우 표면 거칠기가 가장 높은 $1.267 \mu\text{m}$ 을 얻었으며 산성 콜로이달 슬러리를 사용했을 때 가장 낮은 $0.060 \mu\text{m}$ 을 얻을 수 있었다. 측정 결과 표면 거칠기가 가장 낮은 콜로이달 슬러리가 가장 우수한 CMP 성능을 보였으며 이는 부드러운 금속인 Al에 상대적으로 부드러운 연마제인 콜로이달 실리카 슬러리가 보다 낮은 거칠기를 유발한다고 생각된다 (Table 2).

전체적인 실험 결과 산성 콜로이달 실리카 슬러리의 경우 가장 높은 연마율과 가장 낮은 표면 거칠기를 나타내었다. 또한 산성 콜로이달 슬러리의 경우 citric acid와 같은 첨가제를 다양하게 선택할 수 있어 기존의 다른 연마제를 이용한 슬러리 보다 활용도가 더 높으리라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 부드러운 금속인 Al에 스크래치와 같은 연마 손상을 최소화하기 위하여 연마제에 따른 특성을 평가해 보았다. 실험에 사용된 연마제는 알루미나, 폼드 실리카, 염기성 콜로이달 실리카 및 산성 콜로이달 실리카가 사용되었다. 공정 조건으로 연마제 및 인산의 함량, 연마압력을 변화시켜가면서 bulk Al의 연마율을 측정해 보았다.

실험결과 연마제 함량의 경우 모든 슬러리에 있어서 약 2 wt%를 기점으로 연마율이 둔화되는 경향을 나타내었다. 따라서 연마제의 함량을 늘리더라도 연마율의 비례적인 증가는 기대할 수 없었다. 인산 첨가의 경우 알루미나와 폼드 실리카 슬러리에서 연마율을 증가시키는 경향을 나타내었으나 산성 콜로이달 실리카 슬러리의 경우에는 2 vol% 이후 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 염기성 콜로이달 슬러리의 경우에는 인산 첨가 없이 알루미나 슬러리와 유사한 연마율을 얻을 수 있었다. 연마율을 높이기 위해 과도한 인산을 첨가할 경우 슬러리의 안정성이 떨어지게 되어 표면에 스크래치를 증가시키

는 요인으로 작용하였다. 과도한 연마압력 역시 표면에 스크래치를 증가시키는 요소임을 확인하였다.

전체적인 실험 결과 산성 플루오이탄 실리카 슬러리의 경우 가장 높은 연마율과 가장 낮은 표면 거칠기를 나타내었으며, 다양한 첨가제를 사용할 수 있어 기존의 다른 연마제를 이용한 슬러리 보다 활용도가 더 높으리라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업 (과제번호: 05K1401-00215)과 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

1. W. E. Frank, *Microelectronic Eng.*, **33**, 85 (1997).
2. W. T. Tsenga, Y. L. Wangb and J. Niu, *Thin Solid Films*, **370**, 96 (2000).
3. Y. L. Wang, J. Wu, C. W. Liu, T.C. Wang and J. Dun, *Thin Solid Films*, **332**, 397 (1998).
4. K. Derbyshire, *Semiconductor Manufacturing*, **7**, 17 (2006).
5. R. F. Schnabel, L. A. Clevenger, G. Costrini, D. M. Dobuzinsky, R. Filippi, J. Gambino, G. Y. Lee, R. C. Iggulden, C. Lin, Z. G. Lu, X. J. Ning, R. Ramachandran, M. Ronay, D. Tobben and S. J. Weber, *Aluminum dual damascene metallization for 0.175 mm DRAM generations and beyond*, *Microelectronic Eng.*, **50**, 265 (2000).
6. F. Malik and M. Hassan, *Thin Solid Films*, **270**, 612 (1995).
7. H. C. Chen, S. C. Fan, J. H. Lin, Y. L. Cheng, S. P. Jeng and C. M. Wu, *Thin Solid Films*, **469-470**, 487 (2004).
8. M. Kodera, S. I. Uekusa, Y. Matsui, N. Miyashita, A. Shigeta, S. Takahashi, M. Kawai, H. Kawamoto and M. Tsujimura, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **767**, 1 (2003).
9. I. Beinglass and M. Naik, *Thin Solid Films*, **320**, 35 (1998).
10. W. Cho, Y. Ahn, C. W. Baek and Y. K. Kim, *Microelectronic Eng.*, **65**, 13 (2003).
11. Y. Ahn, J. Y. Yoon, C. W. Baek and Y. K. Kim, *Wear*, **257**, 785 (2004).
12. M. R. Oliver, *Chemical Mechanical Planarization of Semiconductor Materials*, chapter 1, Springer, Heidelberg, (2004).
13. P. Kueber, H. Aochi, J. Gambino, T. Licata, T. Matsuda, S. Nguyen, M. Okazaki, H. Palm and M. Ronay, *Appl. Surf. Sci.*, **91**, 359 (1995).
14. I. Heyvaert, M. V. Hove, A. Witvrouw, K. Maex, A. Saerens, P. Roussel and H. Bender, *Microelectronic Eng.*, **50**, 291 (2000).
15. H. S. Kuo and W. T. Tsai, *Mater. Chem. and Phys.*, **69**, 53 (2001).
16. P. C. Hayes, *Process Principles in Minerals & Materials Production*, 2nd ed., chapter 6, Hayes Publishing Co. (1993).