

Cu CMP에서의 연마 균일성에 관한 기계적 해석

Mechanical Analysis on Uniformity in Copper Chemical Mechanical Planarization

이현섭¹, 박범영¹, 정해도^{1,a}, 김형재²

(Hyunseop Lee¹, Boumyoung Park¹, Haedo Jeong^{1,a}, and Hyoungjae Kim²)

Abstract

Most studies on copper Chemical Mechanical Planarization (CMP) have focused on material removal and its mechanisms. Although many studies have been conducted on the mechanism of Cu CMP, a study on uniformity in Cu CMP is still unknown. Since the aim of CMP is global and local planarization, the approach to various factors related to uniformity in Cu CMP is essential to elucidate the Cu CMP mechanism as well. The main purpose of the experiment reported here was to investigate and mechanically analyze the roles of slurry components in the formation of the uniformity in Cu CMP. In this paper, Cu CMP was performed using citric acid(C₆H₈O₇), hydrogen peroxide(H₂O₂), colloidal silica, and benzotriazole(BTA, C₆H₄N₃H) as a complexing agent, an oxidizer, an abrasive, and a corrosion inhibitor, respectively. All the results of this study showed that within-wafer non-uniformity(WIWN) of Cu CMP could be controlled by the contents of slurry components.

Key Words : Copper CMP, Uniformity, Citric acid, Hydrogen peroxide, Colloidal silica, Benzotriazole (BTA)

1. 서론

다층구조의 집적회로(integrated circuit)에서 수평배선과 수직배선의 금속 재료로써 알루미늄(Al)과 텅스텐(W)이 주로 사용되어 왔으나, 배선의 미세화로 인하여 electro migration과 RC지연 등의 문제가 대두되었다.[1] 이를 해결하기 위하여 알루미늄보다 낮은 저항(resistivity)과 높은 electro-migration resistance를 가지는 구리(Cu)를 이용한 다마스킨 (damascene) 공정이 제기되었고, 칩의 다층화와 고집적화에 따른 구리배선의 화학기계적 연마(CMP; Chemical Mechanical Planarization)에 많은 관심을 가지게 되었다[2,3].

Hernandez 등은 프탈산(phthalic acid)을 착화제(complexing agent)로 하는 Cu CMP 슬러리에서

어떠한 역할을 하는지에 대해서 XPS(X-ray photoelectron spectroscopy) 측정을 통한 표면 분석을 통해서 과산화수소(H₂O₂; hydrogen peroxide)의 함량이 구리 산화막(Copper oxide layer)의 두께에 영향을 미치며 이는 슬러리(slurry)의 연마 제거율(Material removal rate)을 결정하는 요소라고 하였다[4]. Tsai 등은 산화제(oxidizer)로 과산화수소와 착화제로 구연산(C₆H₈O₇; citric acid)의 조합을 가진 Cu CMP 슬러리는 착화제가 산화제로 인해서 발생하는 Cu²⁺ 이온들과 결합하여 구리 착화물(complex)을 형성함으로써 연마 제거율을 높여준다는 연구 결과를 얻었다[5]. 그러나 CMP가 웨이퍼의 광역(global) 혹은 국소(local) 평탄화(planarization)를 목적으로 하는 공정임에도 불구하고, 대부분의 Cu CMP에 관한 연구는 화학적인 반응으로 인한 구리의 제거 메카니즘(mechanism)에만 초점이 맞추어져 있었다.

따라서, 본 연구에서는 기존에 연구된 Cu CMP의 연마 메카니즘을 기초로 하여, Cu CMP에서 연마균일성(uniformity)이 어떻게 형성되는지에 관하여 기계적인 관점에서 접근해 보고자 한다.

1. 부산대학교 일반대학원 정밀기계공학과 (부산시 금정구 장전동 산 30)
2. 한국생산기술연구원 부산지역본부
a. Corresponding Author : hdjeong@pusan.ac.kr
접수일자 : 2006. 9. 6
1차 심사 : 2006. 9. 18
심사완료 : 2006. 12. 19

표 1. 실험조건.

Table 1. Experimental conditions.

Polisher	GNP POLI500
Pressure	3.1 psi
Velocity	80 rpm
Polishing pad	IC1400(Nitta Haas)
Slurry flow rate	150 ml/min
Temperature	23 °C
Complexing agent	C ₆ H ₈ O ₇
Oxidizer	H ₂ O ₂
Abrasive	Colloidal silica (22 nm)
Corrosion inhibitor	C ₆ H ₄ N ₃ H
pH adjustor	NH ₄ OH, HNO ₃

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 구리 CMP 슬러리는 표 1에서와 같이 산화제로 과산화수소, 착화제로 구연산, 연마입자(abrasive)로 콜로이드 실리카(colloidal silica), 부식방지제로 BTA(C₆H₄N₃H; benzotriazole)를 사용하였으며, 슬러리의 pH는 NH₄OH, HNO₃를 사용하여 pH 4로 유지하였다. CMP 장비는 G&P Technology의 POLI500을 이용하였으며 모든 실험은 압력 3.1 psi, 헤드와 테이블 회전속도 80 rpm에서 실시하였다. 웨이퍼(wafer)는 0.5 μm 두께의 실리콘 산화막(SiO₂)과 탄탈륨(Ta) 250 Å 위에 1.5 μm 두께의 구리박막을 가진 4인치 웨이퍼를 이용하였다.

구리박막의 두께는 Four point probe(Changmin Tech)를 이용하여 측정하였다. 연마 불균일도(WIWNNU; Within-wafer non-uniformity)는 식(1)을 이용하여 계산하였으며, 측정 시 웨이퍼 가장자리 5 mm는 제외하였다. 식(1)에서 σ와 X_{avg}는 각각 표준편차(standard deviation)와 연마 제거율의 평균값을 뜻한다.

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

3. 결과 및 고찰

그림 1(a)는 3wt%의 콜로이드 실리카와 3vol%의 과산화수소를 함유하고 있는 슬러리에 구연산의 함량을 변화시켰을 때의 연마 제거율과 연마 불균일도를 도시한 그림이다. 연마 제거율은 구연

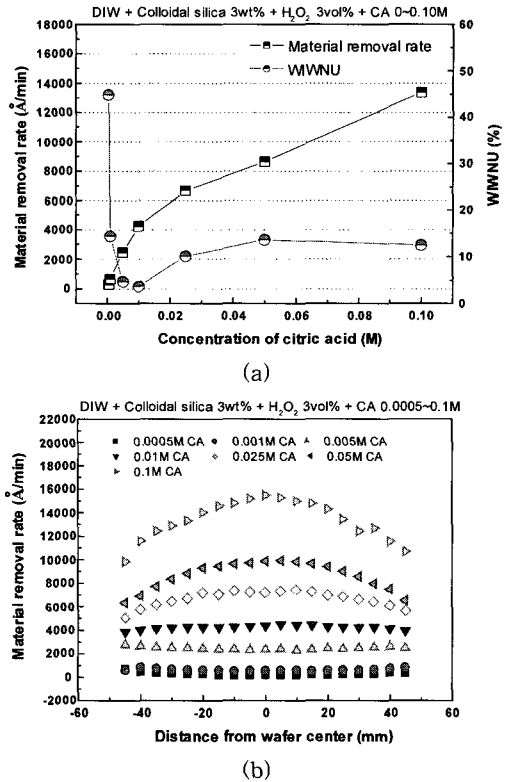


그림 1. Cu CMP 슬러리의 구연산 함량이 CMP 결과에 미치는 영향; (a) 연마 제거율과 연마 불균일도, (b) 연마 제거율의 프로파일.

Fig. 1. Effects of citric acid concentration in Cu CMP slurry on Cu CMP results; (a) material removal rate and WIWNNU, (b) material removal rate profiles

산의 함량에 따라서 지속적으로 증가하는 추세를 보이지만, 연마 불균일도는 구연산 함량 0.01M까지 감소한 후, 다시 증가하는 경향을 보였다. 특히, 그림 1(b)에 도시한 구연산의 함량에 따른 연마 제거율의 프로파일(material removal rate profile)처럼 구연산의 함량이 높은 슬러리일수록 전체적인 연마 제거율이 높아지지만 웨이퍼 중앙부(wafer center)의 연마 제거율이 많이 높아짐을 알 수 있다.

그러한 이유는 그림 2에서와 같이 CMP시 발생하는 압력분포(pressure distribution), 온도분포(temperature distribution), 패드 마모 프로파일(pad wear profile)의 조합으로 설명할 수 있다. 일반적으로, CMP시 발생하는 웨이퍼 상의 온도분포는 그림 2(a)와 같다. 이는 슬라이딩 거리(sliding

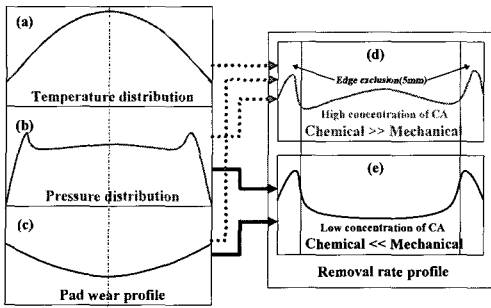


그림 2. 구연산 함량에 따른 연마 제거율 프로파일과 기계적 인자들과의 관계; (a) 온도분포, (b) 압력분포, (c) 패드 마모 프로파일, (d) 구연산의 함량이 높은 경우의 연마율 프로파일, (e) 구연산의 함량이 낮은 경우의 연마율 프로파일.

Fig. 2. Relation between material removal rate profiles as a function of the concentration of citric acid in Cu CMP slurry and mechanical factors; (a) temperature distribution, (b) pressure distribution, (c) pad wear profile, (d) material removal rate profile of high concentration of citric acid, (e) material removal rate of low concentration of citric acid.

distance)에 의해 웨이퍼와 패드의 마찰(friction)에 의해서 발생하게 된다[6]. 또한 헤드가 웨이퍼를 패드 위로 가압하는 방식인 회전형 CMP장비에서는 그림 2(b)와 같은 압력분포가 발생하게 된다[7]. 마지막으로 슬라이딩 거리와 연마 중의 압력에 의해서 연마 패드는 그림 2(c)와 같은 형상으로 마모되는 경향을 띄게 된다[8]. Cu CMP는 슬러리와 Cu 웨이퍼의 화학적인 반응에 의해서 지배적으로 재료를 제거하는 매카니즘을 가진다. 즉, Cu CMP는 기계적인 제거보다는 화학적인 제거의 개념이 강하다고 할 수 있다. 화학적인 제거의 개념이 강할 경우 연마 제거율은 온도에 상대적으로 민감하게 될 것이다. 따라서 구연산의 함량이 적은 경우, 화학적인 제거보다 기계적인 제거의 역할이 더 커지고 온도분포의 영향을 상대적으로 작게 받게 되어 그림 2(e)와 같은 연마 제거율의 프로파일을 가지게 된다. 반면, 구연산의 함량이 많아서 화학적인 영향이 강해지면, 온도분포가 연마 제거율에 미치는 영향이 강해져 그림 2(d)와 같은 연마 제거율의 프로파일을 가지게 되는 것으로 생각된다.

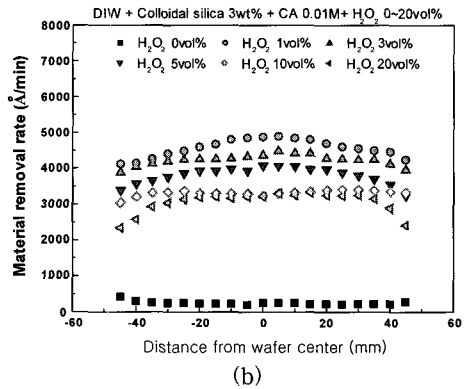
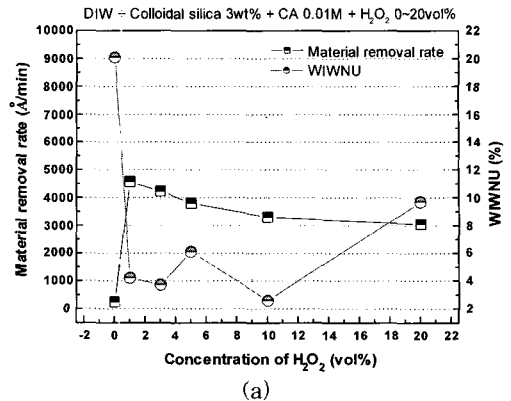
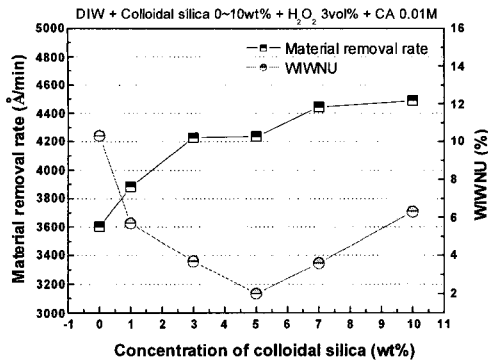


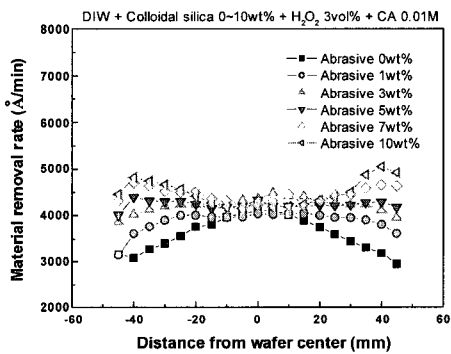
그림 3. Cu CMP 슬러리의 과산화수소 함량이 CMP 결과에 미치는 영향; (a) 연마 제거율과 연마 불균일도, (b) 연마 제거율의 프로파일.

Fig. 3. Effects of hydrogen peroxide concentration in Cu CMP slurry on Cu CMP results; (a) material removal rate and WIWNU, (b) material removal rate profiles.

그림 3은 3wt%의 콜로이드 실리카와 0.01M의 구연산을 함유한 Cu CMP 슬러리에서 과산화수소의 함량이 CMP 결과에 미치는 영향에 관해 도시한 것이다. 연마 제거율은 과산화수소 함량 1vol% 까지 증가한 후, 감소하는 경향을 보인다. 이는 과산화수소의 함량이 증가함에 따라서 구리 산화막이 고르게 두텁게 성장하게 되어 일정 함량이 넘어서면 오히려 연마 제거율을 떨어뜨리게 되기 때문이라고 생각한다.[4] 또한 그림 3(b)에 보인 연마 제거율의 프로파일을 살펴보면, 연마 불균일도는 과산화수소의 함량에 의존하지 않고 웨이퍼 전면에 걸친 연마 제거율이 과산화수소의 함량에 관계



(a)



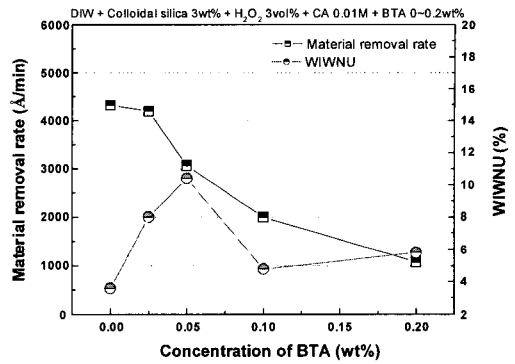
(b)

그림 4. Cu CMP 슬러리의 콜로이드 실리카 함량이 CMP 결과에 미치는 영향; (a) 연마 제거율과 연마 불균일도, (b) 연마 제거율의 프로파일.

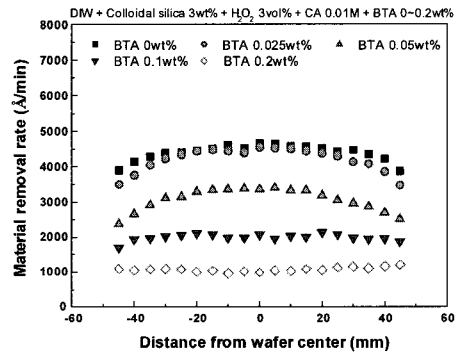
Fig. 4. Effects of colloidal silica concentration in Cu CMP slurry on Cu CMP results; (a) material removal rate and WIWNU, (b) material removal rate profiles.

없이 거의 일정한 것을 알 수 있다. 따라서 Cu CMP 슬러리에서 과산화수소는 구리를 산화시켜서 연마를 촉진 시키는 역할을 하지만, 연마 균일성에는 큰 영향을 미치지 못한다고 할 수 있다.

그림 4는 Cu CMP 슬러리의 구성 요소 중 웨이퍼의 표면을 기계적으로 연마하는 작용을 하는 콜로이드 실리카 입자의 함량 변화에 따른 CMP 결과를 도시한 그래프이다. 그림 4(a)에서와 같이 과산화수소 3vol%와 구연산 0.01M을 함유한 슬러리에서 콜로이드 실리카의 함량이 증가할수록 연마 제거율은 증가하는 반면, 연마 불균일도는 콜로이드 실리카 함량 6wt%까지 감소 후, 다시 증가하는 경향을 보였다. 이러한 이유는 그림 4(b)에서 도시한 연마 제거율의 프로파일을 살펴보면 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 5. Cu CMP 슬러리의 BTA 함량이 CMP 결과에 미치는 영향; (a) 연마 제거율과 연마 불균일도, (b) 연마 제거율의 프로파일.

Fig. 5. Effects of BTA concentration in Cu CMP slurry on Cu CMP results; (a) material removal rate and WIWNU, (b) material removal rate profiles.

그림 4(b)에서 보이는 연마 제거율의 프로파일은 콜로이드 실리카 입자의 함량이 증가할수록 웨이퍼 가장자리(wafer edge)의 연마 제거율이 증가하는 경향을 보인다. 반면, 웨이퍼 중앙부의 연마 제거율의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 본 실험에서 사용된 콜로이드 실리카 입자가 웨이퍼의 중앙부보다는 가장자리를 기계적으로 연마하고 있음을 뜻한다고 할 수 있다. 다시 말해서, 콜로이드 실리카 입자의 함량을 변화시킴으로써 웨이퍼 외주의 연마 제거율을 조절하여 연마 균일도를 제어할 수 있다.

부식방지제로 사용되는 BTA는 그림 5(a)와 같이 슬러리 내의 함량이 많아질수록 슬러리에 의한 화학적인 식각률(etching rate)을 낮추기 때문에 연

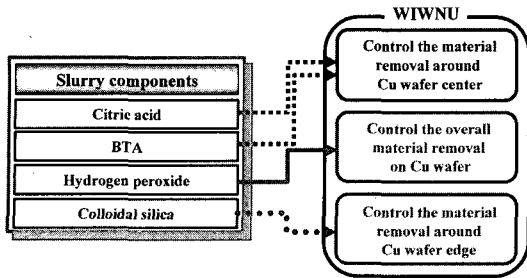


그림 6. Cu CMP 슬러리의 구성요소가 연마 불균일도에 미치는 영향.

Fig. 6. Effects of Cu CMP slurry components on uniformity.

마 제거율이 낮아지는 경향을 가진다. 하지만, 웨이퍼 중앙의 연마 제거율을 가장자리에 비해 상대적으로 많이 감소시키기 때문에, 그림 5(a)의 연마 불균일도와 그림 5(b)에 나타난 연마 제거율의 프로파일 변화처럼 슬러리내의 BTA 함량이 많아질수록 연마 제거율은 낮아지지만, 웨이퍼 전면에 걸쳐서 고른 연마 제거율을 얻을 수 있었다. 그 이유는 BTA의 첨가에 의해서 생성되는 Cu-BTA complex 층[9,10]이 연마 시 구리 박막의 화학적인 제거와 기계적 제거가 조화를 이룰 수 있도록 하기 때문이라고 생각된다. 따라서 Cu CMP 슬러리내의 BTA함량 역시 Cu CMP에서 연마 균일도를 결정 할 수 있는 요소라고 할 수 있다.

Cu CMP 슬러리 내의 구연산과 BTA함량은 웨이퍼 중앙의 연마 제거율에 영향을 미치고, 콜로이드 실리카 입자의 함량은 웨이퍼 가장자리의 연마 제거율을 변화시킨다. 또한, 과산화수소의 함량은 연마 제거율의 프로파일을 변화시키지는 못했지만 구리를 산화시켜 연마를 촉진 시키는 역할을 한다. 따라서, Cu CMP 슬러리의 구성요소가 연마 불균일도에 미치는 영향을 그림 6과 같이 표현 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 기존에 연구되었던 Cu CMP에서의 화학적인 재료 제거 메커니즘을 바탕으로 CMP에서의 기계적 요소들을 고려하여 Cu CMP에 있어서의 연마 균일성에 관하여 고찰해 보았다.

구연산의 함량이 증가함에 따라서 연마 제거율 프로파일은 웨이퍼의 중앙이 빠르게 연마되는 형

상을 가졌다. 이는 CMP시 온도분포, 압력분포, 패드마모 프로파일의 영향에 의한 것으로 생각된다. 반면, 과산화수소 함량의 변화는 연마 제거율 프로파일의 변화에 크게 영향을 미치지 못하고 전체적인 연마제거량만을 변화시켰다. 콜로이드 실리카는 웨이퍼의 가장자리를 기계적으로 제거함으로써 연마 제거율의 프로파일을 제어하는 역할을 하는 것으로 보인다. 마지막으로 부식 방지제로 사용된 BTA는 웨이퍼 중앙의 연마 제거율을 가장자리에 비해 상대적으로 많이 낮춰주기 때문에 웨이퍼의 전체적인 연마 제거율을 감소시키면서 동시에 연마 균일성을 높여주는 역할을 하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 “50 nm급 반도체용 Oxide CMP 장비의 부품소재 개발” 과제 의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] C.-K., Hu, B. Luther, F. B. Kaufman, J. Hummel, C. Uzoh, and D. J. Pearson, "Copper interconnection integration and reliability", *Thin Solid Films*, Vol. 262, Iss. 1-2, p. 84, 1995.
- [2] S. P. Murarka, "Metallization Theory and Practice for VLSI and ULSI", Butterworth-Heinemann, Boston, p. 100, 1993.
- [3] P. Wrschka, J. Hernandez, G. S. Oehrlein, and J. King, "Chemical mechanical planarization of copper damascene structures", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 2, p. 706, 2000.
- [4] J. Hernandez, P. Wrschka, and G. S. Oehrlein, "Surface chemistry studies of copper chemical mechanical planarization", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 148, No. 7, p. 389, 2001.
- [5] T.-H. Tsai, Y.-F. Wu, and S.-C. Yen, "Glycolic acid in hydrogen peroxide-based slurry for enhancing copper chemical mechanical polishing", *Microelectronic Engineering*, Vol. 77, Iss. 3-4, p. 193, 2005.

- [6] D. H. Kwon, H. J. Kim, H. D. Jeong, E. S. Lee, and Y. J. Shin, "A study on the correlation between temperature and CMP characteristics", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 10, p. 156, 2002.
- [7] W.-T. Tseng, Y.-H. Wang, and J.-H. Chin, "Effects of film stress on the chemical mechanical polishing process", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 146, No. 11, p. 4273, 1999.
- [8] H. J. Kim and H. D. Jeong, "Effect of process conditions on uniformity of velocity and wear distance of pad and wafer during chemical mechanical planarization", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 33, No. 1, 2004.
- [9] Y. Luo, T. Du, and V. Desai, "Chemical-mechanical planarization of copper : The effect of inhibitor and complexing agent", *Mat. Res. Soc. Proc.*, Vol. 767, p. F6.10.1, 2003.
- [10] Q. Luo and S. V. Babu, "Dishing effects during chemical mechanical polishing of copper in acidic media", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 12, p. G4639, 2000.