

화학적 기계 연마(CMP)에 의한 단결정 실리콘 층의 평탄 경면화에 관한 연구

이재춘* · 홍진균 · 유학도

LG 실트론 연구소

(논문접수일 : 2001년 3월 3일)

Planarization & Polishing of single crystal Si layer by Chemical Mechanical Polishing

Jae Choon Lee*, Jin Kyun Hong, and Hak Do Yoo

R&D Center, LG Siltron Inc, Kumi 730-350, Korea

(Received March 3, 2001)

요 약

CMP(Chemical Mechanical Polishing)는 반도체 소자 제조공정 중 다층 배선구조의 평탄 경면화에 널리 이용되고 있다. 차세대 웨이퍼로 각광받는 SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼 제조공정 중 웨이퍼 표면 미소 거칠기를 개선하기 위해서 본 논문에서는 여러 가지 가공변수(슬러리와 연마패드)에 따른 CMP 연마능률과 표면 미소 거칠기 변화에 대해 연구하였다.

결과적으로 연마능률은 슬러리의 입자 크기가 증가할수록 이에 따라 증가하였으며, 미소 거칠기는 슬러리의 연마입자보다는 연마패드에 영향이 더욱 지배적이다.

AFM(Atomic Force Microscope)에 의한 평가에서 표면 미소 거칠기가 27 ÅRms에서 0.64 ÅRms로 개선됨을 확인 할 수 있었다.

Abstract

Recently, Chemical Mechanical Polishing(CMP) has become a leading planarization technique as a method for silicon wafer planarization that can meet the more stringent lithographic requirement of planarity for the future submicron device manufacturing.

The SOI(Silicon On Insulator) wafer has received considerable attention as bulk-alternative wafer to improve the performance of semiconductor devices.

In this paper, the objective of study is to investigate Material Removal Rate(MRR) and surface micro-roughness effects of slurry and pad in the CMP process.

When particle size of slurry is increased, Material Removal rate increase. Surface micro-roughness is greater influenced by pad than by particle size of slurry.

As a result of AFM measurement, surface micro-roughness was improved from 27 ÅRms to 0.64 ÅRms.

1. 서 론

현재 반도체 산업의 주력인 벌크 실리콘 소자의 경우, Design Rule이 0.13 μm 이하로 줄어들게 되는 경우에는 기존의 Scaling을 통한 집적도 및 저 전력화에 한계를 드러낼 것으로 예상되고 있다. 최근 들어 벌크 MOSFET 소자 크기가 점점 작아짐에 따라 기생 정전 용량(parasitic capacitance) 등 여러 가지 기생 효과가 소자 특성에 심각한 영향을 주게 되었다 [1,2]. 이러한 기생효과를 줄일 수 있는 방법 중 하나로 1930년대에 처음 제기된 이중막 실리콘(Silicon On Insulator, 이하 SOI) 기술은 산화막(SiO_2) 층 위에 MOSFET을 만드는 것이다. 이러한 공정으로 제작되어진 MOSFET의 경우, 구조적으로 활성 영역이 기판으로부터 완전히 격리되어 있기 때문에 열전자 효과(Hot-Carrier effect), 래치 업(Latch-up), 몸체 효과(Body effect) 등의 소자 특성이 기존의 벌크 MOSFET 소자보다 현저히 감소되며, 접합 면적이 감소함에 따라 기생 정전 용량이 감소하여 SRAM, Microprocessor 등 고속소자 및 회로에 적용함에 있어 큰 이점을 갖는다. 또한 SOI MOSFET은 그 구조상 3차원 집적이 가능하기 때문에 집적도 면에서 기존의 벌크 MOSFET보다 우수하고 제작공정의 단순함, 설계의 용이성 및 유연성, 낮은 전력 소모 등의 훌륭한 장점을 갖게 된다 [3,4,5].

기존의 단결정 실리콘과 거의 유사한 특성을 가진 SOI 웨이퍼를 제조할 수 있는 기술 가운데 최근 각광받고 있는 GPTM(Genesis ProcessTM) 기술은 기존의 BE(Bonded Etchback) SOI 웨이퍼 제조 방법의 장점과 SIMOX(Separation by IMplanted OXYgen) 웨이퍼 제조 방법의 장점을 갖춘 제조 방법이다 [6,7].

제조 공정 상의 특징으로 표면 평탄 경면화를 위하여 연마(Polishing)공정이 필요하다. SOI층 표면의 평탄 경면화가 이루어지지 않은 상태에서 소자 제조 공정이 이루어질 경우, 배선단락 및 공정 수율 감소를 유발시킬 수 있다.

이와 같이, SOI층의 평탄 경면화가 선행되어야 하고, 이러한 평탄 경면화를 위해서 CMP(Chemical Mechanical Polishing)가 유력한 기술로 주목받고 있다 [8,9,10].

본 연구에서는 기존의 반도체 소자공정에서 실

리콘 산화막이나 금속전극 연마에 사용하고 있는 CMP(Chemical Mechanical Polishing)법을 이용하여 슬러리와 연마패드에 따른 단결정 실리콘 층의 연마 능률(MRR: Material Removal Rate)과 각각의 표면 미소 거칠기 변화를 조사하였고, GPTM(Genesis ProcessTM)로 제조된 SOI wafer의 SOI층과 동일한 표면 미소 거칠기를 가지는 Etched 웨이퍼로 단결정 실리콘 층의 표면 미소 거칠기 변화를 관찰하였다

2. 실험 방법 및 조건

단결정 실리콘 층의 연마능률(MRR: Material Removal Rate)을 측정하기 위한 실험에서는 아래 Fig. 1의 구조를 가지는 웨이퍼를 사용하였다.

단결정 벌크(bulk) 실리콘웨이퍼 위에 실리콘 Epitaxial 층을 10 μm 두께로 CVD(Chemical Vapor Deposition) 방법으로 성장 시켰다.

표면 미소 거칠기 변화를 관찰하기 위한 실험에서는 GPTM으로 제조된 SOI 웨이퍼와 동등한 표면 미소 거칠기를 가지는 웨이퍼를 만들기 위해 웨이퍼 표면을 Wright Etchant(2g $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ in 60 ml H_2O . Then add: 60 ml 48% HF, 30 ml 69% HNO_3 , 30 ml 5 M CrO_3 (1gm CrO_3 /2ml H_2O), 60 ml HAC (Acetic acid-glacial))를 사용하여 2분간 표면 에칭하여 표면 미소 거칠기가 27~40 Å Rms의 실험용 웨이퍼를 제조 할 수 있었고, 이때의 표면 미소 거칠기 상태는 Fig. 2와 같다.

Fig. 3은 본 실험에 사용한 CMP Polisher (6DS-SP, Strasbaugh社)로서 연마작업을 진행하는 스펀들 헤드와 테이블을 나타낸 그림이다. CMP 장치는 2개의 스펀들 헤드와 두 개의 테이블로 구성되어 있다.

8" 웨이퍼를 진공 척(Vacuum Chuck)으로 고정하며, 최고 500 lbs의 하중(Down Force)의 스펀들 헤드

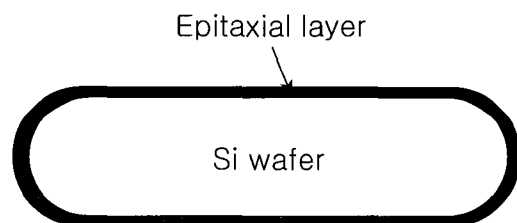


Fig. 1 Schematic diagram of Epi wafer.

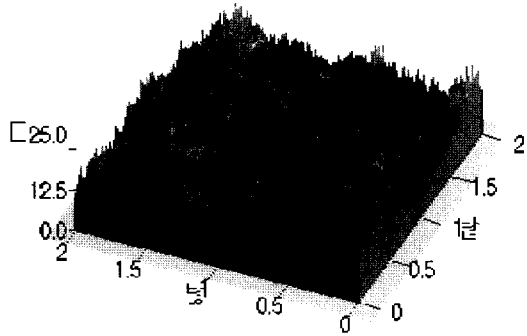


Fig. 2 Surface morphology of Etched wafer after CMP(AFM, 2 μm×2 μm)

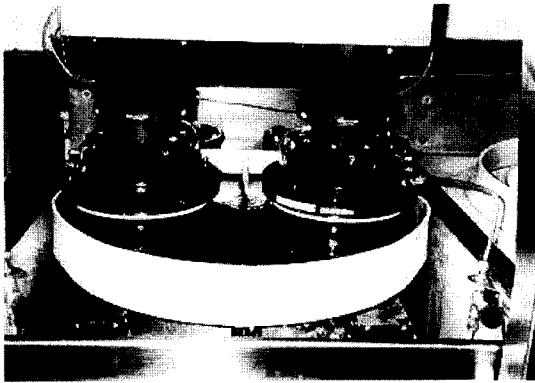


Fig. 3 Photography of 6DS-SP.

와 테이블의 회전속도는 10~250 rpm까지 변환 가능하다.

웨이퍼 내부의 모든 임의의 점에서 상대 속도를 같게 하기 위하여 스피들 헤드와 테이블의 회전속도를 같게 하였다 [13].

연마 능력과 표면 미소 거칠기 변화를 측정하기 위해 사용한 패드와 슬러리는 Table 2에 나타낸 바와 같이, 경질 패드인 폴리우레탄 계열의 IC1000 (Rodel社)과 IC1400(Rodel社), 연질 패드인 Suba500 (Rodel社)과 CIEGAL 7355(Chiyoda社)를 사용하였으며, 연마제인 슬러리는 ILD1300(Rodel社), Syton(Dupont社), FGL3900(Fujimi社)을 사용하였다.

연마 패드 부착과 슬러리 공급 위치는 아래 Fig. 4와 같다.

구체적인 실험조건은 Table 1과 같다.

연마능력(MRR)은 CMP 공정 후 잔류 Epitaxial 실리콘 층 두께를 FT-IR(QS500, Bio-Rad)을 이용하

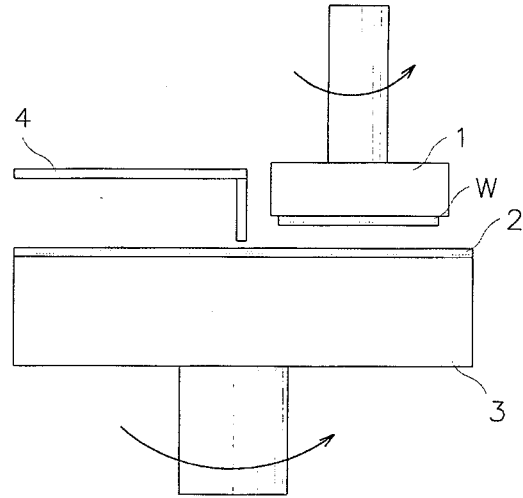


Fig. 4 Schematic diagram of CMP(1. Spindle Head, 2. Pad, 3. Table, 4. Slurry, W.Wafer).

Table 1 Experimental conditions of CMP.

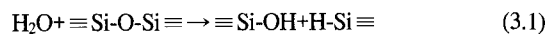
항 목		Polishing	Cleaning
Slurry	Mixing ratio(DIW:Slurry)	10:1	-
	Flow rate(ml/min)	400	-
Down Force(psi)		1~6	1
Back Pressure(psig)		0	-14.7
Spindle Speed(rpm)		50	50
Table Speed(rpm)		50	50
Deionized Water		OFF	ON
Run Time(sec)		300	60

여 측정하였으며, 표면 미소 거칠기는 AFM(Auto Probe M5, PSI社)을 이용하여 Contact mode 방식으로 측정 및 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연마 능력(MRR)

연마공정은 식 3.1과 같다.



관련식 3.1에서 고 알칼리(High PH) 슬러리의 화학적 작용에 의해 실리콘 웨이퍼 표면으로부터 Soft

Oxide와 Silicate 복합물이 형성된다.

이 반응물들을 제거하여 고 알칼리 연마액에 노출되어 화학반응을 할 수 있도록 Fresh surface를 연속적으로 만들어내는 기계적 작용을 하기 위해 연마패드와 슬러리가 사용된다.

먼저, 준비된 Epitaxial 실리콘 웨이퍼(Epi두께: 10 μm)를 이용하여 각 슬러리와 패드 종류에 따라 (Table 2) 연마능률을 측정하였다.

Fig. 5는 Epitaxial 실리콘웨이퍼를 5분간 연마(Polishing)하여 분당 연마 량을 나타내었다.

연마 입자의 크기는 FGL3900의 경우 직경 약 35 nm이며, Syton의 경우 약 50 nm, ILD 1300의 경우 140 nm이다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 연마 패드가 IC1000(Rodel社)로 같은 경우(C, D, E)에는, 슬러리 속의 입자 크기에 따라 연마량이 480, 1800, 4600(Å/min)으로 증가함을 알 수 있었다.

이러한 결과는 아래의 Preston방정식 [9]에서 이미

알려진 바와 같이, 관련식 (3.4)에서 연마능률을 결정하는

$$MRR=Kp(L/A)(\Delta s/\Delta t) \tag{3.2}$$

(Kp: Preston 상수, L: 총압, A: 표면적, Δs/Δt: 선속도)

$$Kp=1/2E \tag{3.3}$$

(E : 연마 표면의 young's modulus)

$$\delta =d*3/4(P/2CE)^{2/3} \tag{3.4}$$

(δ: penetration depth of the abrasive particle, d: diameter of abrasive particle, C: particle fill factor)

연마입자의 투과 깊이(penetration depth)는 연마 입자의 직경에 비례함을 나타내는데, 실험 결과에서 나타난 동일한 연마패드에서 슬러리의 입자가 증가할수록 연마능률이 증가하는 결과와 일치하였다.

동일 슬러리를 사용하는 경우에는 연질 패드인 Suba 500의 연마능률이 경질 패드인 IC1000 보다 3배 이상 높은 연마능률(B, D)을 나타내었으며, 같은 경질 패드인 IC1000과 1400은 유의차(C, F)가 거의 없었다.

이러한 결과는 식 (3.4)에 나타난 입자 충전율 (particle fill factor, C)과의 상관 관계에 따른 결과로 Suba 500, IC1000, IC1400 Pad의 입자 충전율 차이에서 기인 한 것으로 사료된다.

Table 2 Slurries and Pads used in CMP.

실험조건	Pad	Slurry
A	CIEGAL7355	FGL3900
B	Suba 500	Syton
C	IC 1000	FGL3900
D	IC 1000	Syton
E	IC 1000	ILD 1300
F	IC 1400	FGL3900

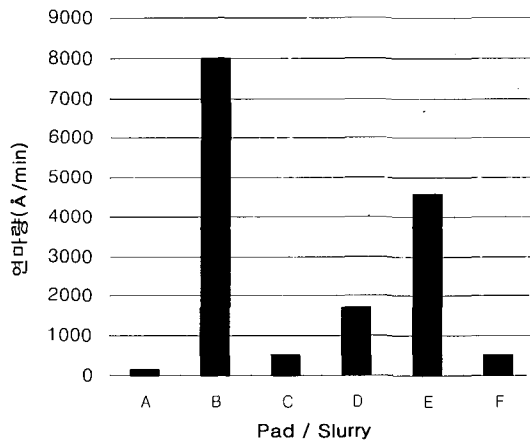


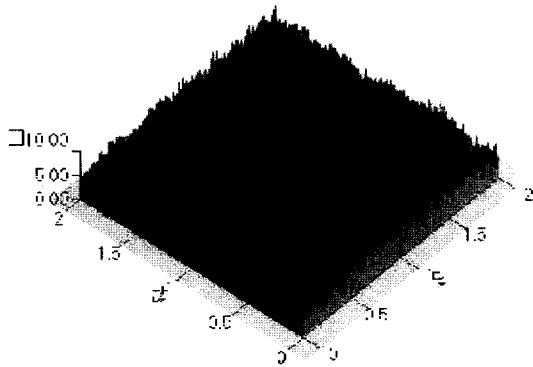
Fig. 5 Polishing rates for slurries and pads.

3.2 표면 미소 거칠기

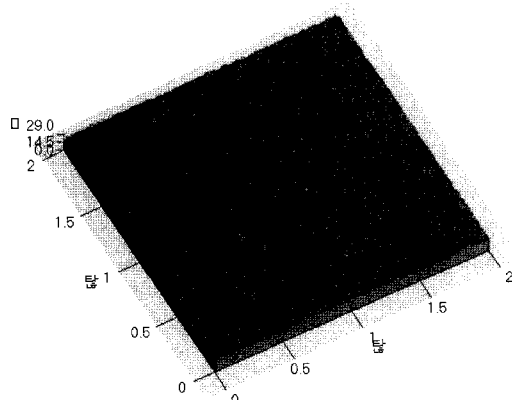
3.2.1 스피들 헤드 하중에 따른 영향

준비된 실험용 웨이퍼(Etched Wafer)로 같은 실험 조건(A)에서 회전하는 스피들 헤드의 하중(Down Force)을 2 psi, 4 psi, 6 psi로 증가시키며 실험을 하였다.

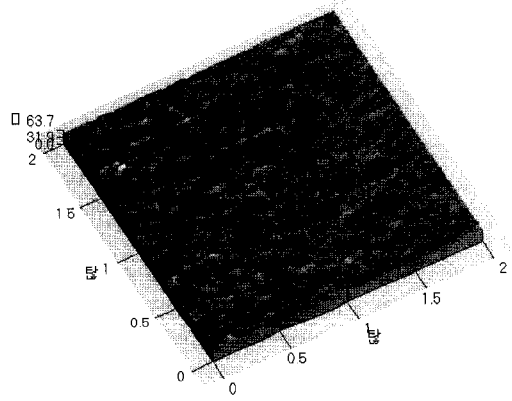
Fig. 6에 나타난 (a)의 경우 스피들 헤드의 하중이 2 psi일 때 표면 미소 거칠기는 0.97 ÅRms 이고, (b)의 경우, 즉, 스피들 헤드의 하중이 4 psi일 때는 1.52 ÅRms이며, (c)의 경우, 즉, 스피들 헤드의 하중이 6 psi일 때의 표면 미소 거칠기는 3.36 ÅRms를 나타내었다. 하중이 증가할수록, 연마 능률은 증가하고 [14], 표면 미소 거칠기도 이에 비례하여 증가함을 알 수 있었다.



(a) 2 psi



(b) 4 psi



(c) 6 psi

Fig. 6 Surface morphologies of Post-CMP(AFM, $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$)

이의 결과로 보아 하중이 증가하면 웨이퍼와 연마패드 사이의 기계적 마찰력 증가에 의해서 연마면이 거칠어진다는 사실을 알 수 있었다.

3.2.2 스피들 헤드 회전 속도에 따른 영향

준비된 실험용 웨이퍼로 실험조건 C에서 스피들 헤드의 회전 속도를 증가시키며 연마한 후 표면 미소 거칠기를 측정 한 결과는 Fig. 7과 같다.

위 결과에 따르면, 스피들 헤드의 회전 속도는 식 (3.1)에서 웨이퍼에 적용되는 연마패드의 선속도 ($\Delta s/\Delta t$)와의 관계에 따라서 연마 능력에는 영향을 미치지 않지만 [15], 표면 미소 거칠기에 별 다른 영향을 미치지 않아 연마패드 속도와는 무관함을 알 수 있다.

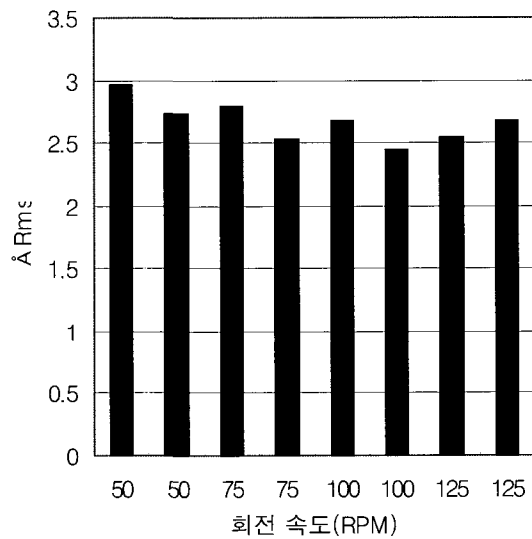


Fig. 7 Surface roughness variation with Spindle speed.

3.2.3 슬러리와 연마패드에 따른 영향

준비된 실험용 웨이퍼(Etched wafer)를 이용하여 각 실험조건(A,B,C,D,E,F)으로 실시한 실험 결과는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다.

위 결과에 따르면, 실험조건 A에서는 연마 공정 후 표면 미소 거칠기가 0.64 ÅRms를 나타내었고, 실험 조건 B에서는 표면 미소 거칠기가 4.00 ÅRms를 나타내었다.

실험조건 C, D, E, F에서는 표면 미소 거칠기가 2.46~2.77 ÅRms로 범위를 가지는 비슷한 측정값을 나타내었다.

슬러리가 동일하고 연마패드가 각각 연질 패드(CIEGAL 7355)와 경질 패드(IC1000, IC1400)인 실험에서는 연질 패드보다 경질 패드의 미소 거칠기 측정값이 높게 나타났으며, 동일한 경질 패드에서

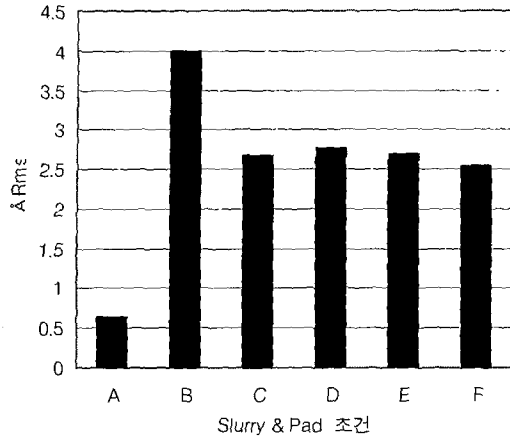


Fig. 8 Surface roughness variation with slurry and pad.

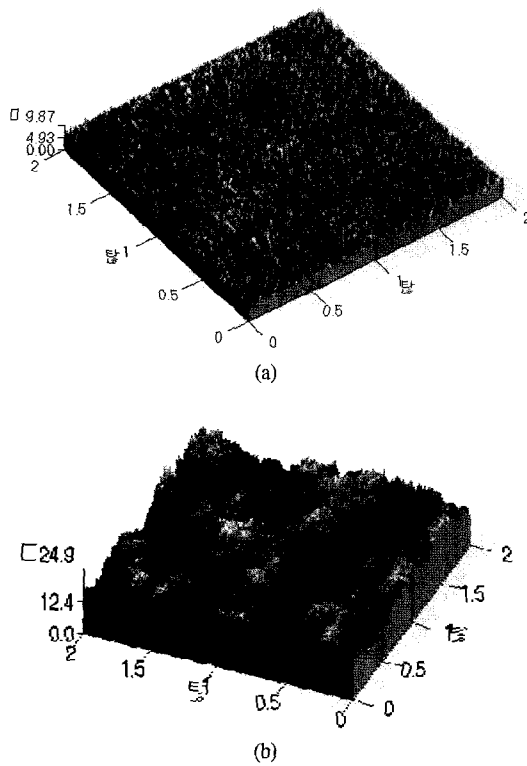


Fig. 9 Surface morphologies of Etched wafer after CMP: (a) Recipe A, (b) Recipe F (AFM, $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$).

입자 크기가 다른 슬러리를 사용한 C, D, E, F의 경우에는 비슷한 측정값을 나타내어 입자 크기와는 무관함을 알 수 있다.

이러한 결과는 연마공정에 영향을 미치는 인자인 슬러리 입자 크기와 연마패드 입자 충전률중 표면 미소 거칠기에는 슬러리의 종류보다는 연마패드에 의한 특성 변화가 지배적임을 알 수 있다.

4. 결 론

현재 웨이퍼 가공에 사용되고 있는 슬러리와 연마패드를 사용하여 표면 미소 거칠기가 27 \AA Rms 인 웨이퍼를 화학적 기계 연마법(CMP)으로 가공한 후 연마 능률과 표면 미소 거칠기 변화에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 연마 능률은 Slurry와 Pad의 종류에 따라 25~8000 \AA/min 으로 다양하게 나타났다

둘째, 표면 미소 거칠기 변화는 연마 전 27~40 \AA Rms 에서 연마 후 0.64~4.00 \AA Rms 로 나타났다. 또한, 스피들 헤드의 하중이 증가할수록 표면 미소 거칠기는 나빠지는 경향을 나타내었고, Slurry의 연마입자 크기가 증가할수록 연마능률은 이에 비례하여 증가하였다.

셋째, 표면 미소 거칠기 변화는 슬러리의 연마 입자 크기보다 사용 연마패드에 영향이 더욱 지배적이다.

따라서, 기존 Device 공정에 적용하던 CMP공정을 SOI 웨이퍼 제조공정에 적용하기 위해서는 연마능률과 표면 미소 거칠기 향상을 고려하여 2단계 연마공정을 실시하므로써, 1차 연마능률을 고려한 SOI 층의 두께 제어에서는 IC1400 연마패드와 FGL3900 슬러리를 사용하고, 표면 미소 거칠기를 고려한 2차 연마에서는 CIEGAL7355 연마패드와 FGL3900 슬러리를 사용하는 것이 최적의 조건임을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] S. Cristoloveanu, S. S. Li, *Electrical Characterization of Silicon-On-Insulator Materials and Devices*, (Kluwer Academic Publishers, 1995).
 [2] H. H. Hosack, *Proceedings of the Fifth International Symposium on Silicon-on Insulator Technology and Devices 92-13*, 5 (1992).

- [3] 이종욱, 고요한, 전기전자재료 **12**(9), 25 (1999).
- [4] A. E. Schmitz, J. Y. Chen, IEEE Trans. Electron Devices **33**(1), 148 (1986).
- [5] W. H. LEE, T. Osakama, T. Sugano, IEEE Trans. Electron devices **35**(11), 1876 (1988).
- [6] P. K. Chu, X. Lu, S. S. K. Iyer, N. W. Cheung, Solid state Technology **40**(5), 9 (1997).
- [7] P. K. Chu, S. Qin, C. Chan, N. W. Cheung, L. A. Larson, Materials Science and Engineering R **17**, 207 (1996).
- [8] 정해도, 김호윤, 전자공학회 논문집 **34** (12), 1046 (1997).
- [9] L. M. Cook, J. non-Cryst. Solids **120**, 152 (1990).
- [10] G. J. Pietsch, Y. J. Chabal, G. S. Higashi, Surface Science **331**, 395 (1995).
- [11] X. Lu, S. S. K. Iyer, C. Hu, N. W. Cheung, J. Min, Z. Fan, P. K. Chu, App. Phys. Lett. **71**, 19 (1997).
- [12] N. W. Cheung, Materials Chemistry and Physics, **46**, 132 (1996).
- [13] S. Runnels, L. H. Eymann, Journal of Electrochemical Society **141**(6), 1698 (1994).
- [14] B. Zhao, F. G. Shi, Electrochemical and Solid State Lett. **2**(3), 145 (1999).
- [15] W. T. Tseng, Y. L. Wang, Journal of Electrochemical Society Lett. **144**(2), (1997).