

W CMP 공정에서 abrasive size 와 shape 영향성

박준상, 박정현 이재동, 홍창기, 조한구, 문주태, 류병일
삼성전자 반도체연구소

The effect of abrasive size and shape on W CMP

JoonSang Park, JungHun Park, Jae-Dong Lee, Changki Hong, HanKu Cho, Joo-Tae Moon,
and Byoung Il Ryu
Semiconductor R&D Center, Samsung Electronics Co.,Ltd

Abstract

W CMP 공정에서 abrasive 의 size 및 shape 에 따른 CMP 거동에 대해 관찰하였으며, 주요 제거 막질인 W 막질과 stopping layer 로 사용되는 Oxide 막질에 대한 압력(P)과 상대 속도(V) 영향성을 관찰하였다. CMP 제거량이 입자의 size 변화에 의존한다는 기존의 이론과는 달리 응집도(aggregate ratio) 변화가 주요 변수임을 밝혀 내었다. 한편, 각 막질에 대한 P,V 영향성 평가를 통해, 변형된 Prestonian equation 이 abrasive size 및 shape 에 상관없이 W 막질의 제거 거동을 설명하는데 중요한 역할을 수행함을 보였다. 그렇지만, W CMP 공정에서 stopping layer 로 사용되는 oxide 막질의 거동을 설명하는 데에는 어려움이 있었으며, 특히 P,V 에 의한 비선형적 removal rate(RR) 거동발생으로 인해 기존의 이론치와는 많은 차이를 나타내었다. 또한, abrasive size 와 shape 에 따라서도 복잡한 거동을 나타낸다.

Key Words : Abrasive, Aggregate Ratio(AR), Prestonian equation, W CMP, Pressure, Relative Velocity

1. 서 론

Chemical mechanical polishing(CMP) 공정은 반도체 공정의 하나로 oxide 막질의 평탄화 뿐만 아니라 metal 및 poly 막질 등의 분리공정에 널리 사용되고 있다. CMP 공정은 wafer 와 pad, 그리고 slurry 간의 상호작용에 의해 작동하게 되는데, 그 외에도 pad, Slurry, wafer 및 abrasive 등의 많은 주변 요인에 의해 영향을 받게 된다.

최근 Device 의 집적화에 따른 CMP 공정에서의 fine control 에 대한 필요성이 제기되고 있으며, CMP mechanism 의 이해를 통한 이의 달성을 위해 활발한 연구가 행해지고 있다. 이는 1920년대 Preston¹⁾에 의해 제기된 model 을 기초로 하고 있는데, 그는 제거 막질의 RR 이 Wafer 위로의 압력(P), platen 과 head 사이의 상대속도(V), 그리고 Preston의 상수라고 알려진 Kp 에 의해 결정된다고 하였다. 최근의 논의에서는 식 (1) 의 형태로 이들의 관계를 표시하며 P 와 V 에 대한 의존성 개념을 포함시켰는데, 압력 영향 지수 $\alpha = 1$ 이며 상대속도 영향 지수 $\beta = 1$ 인 형태가 Preston 방정식이다.

$$RR = Kp \cdot P^\alpha \cdot V^\beta \quad (1)$$

그러나, 이러한 P, V 에 관한 1차 선형 방정식은 실제 CMP 거동을 설명하는데 한계가 있음이 관찰되었고, 이에 따라 새로운 관계식들이 제기되고 있다.²⁾³⁾⁴⁾ Bielmann⁵⁾, Wrschka 등이 metal 막질에 대한 abrasive 효과에 대해 논의하였으나, 이를 포함한 지금까지의 논문은 대부분 주요 제거막질, 즉, oxide 막질에 대한 영향성을 다루어왔다. 그러나, 이는 최근의

다중 막질 노출 CMP 공정에서의 uniformity 및 planarity 특성을 해석하는데 커다란 한계가 있다.

본 논문에서는 CMP 공정에서의 abrasive 영향성에 대한 이해를 돕고자, W CMP 공정에서 주요 제거막질인 W 및 stopping layer 로 사용되는 Oxide 막질에 대한 abrasive size 및 shape 영향성을 살펴보고, 나아가 두 막질에 대한 주요 공정 변수 P, V 영향성을 평가하였다.

2. 실 험

8 inch. wafer 가 사용되었으며, 모든 평가는 IC 1000/Suba IV stack pad (Rohm & Haas) 에서 진행되었고, FREX 200 (EBARA) 설비에서 진행되었다. CMP 에 사용된 막질은 CVD tungsten 막질과 PE-TEOS 막질이다.

일반적으로 W CMP 공정에는 alumina, fumed silica 등이 사용되고 있으나, 본 실험에서는 size 와 shape 의 규정에 있어 유리하도록 colloidal silica 를 사용하였다. Abrasive 의 size 는 두 가지 측정법을 통해 측정하였는데, 각각의 입자를 서로 분리된 구형이라 가정하였을 때, BET 표면적 측정을 통해 환산된 값을 1차 입자 size 라 정의하였으며, dynamic light scattering 법을 사용하여 측정된 값을 2차 입자 size 라 정의하였다. 따라서, (2차입자 size)/(1차 입자 size) 의 값은 입자들간의 응집도를 나타내는 aggregate ratio (AR) 라 정의될 수 있다.

Size 및 shape 에 따른 RR 평가에서는 각기 1차 및 2차 입자의 size 를 달리 제조하여 AR 을 변화시킨 7개의 sample 에 대해 W RR, oxide RR 및 선택비를 평가하였다. (Test_A) 또한, P, V 영향성

평가에서는 입자 size 와 shape 별로 상이하게 제조된 sample 을 2개씩 sampling 하여 4가지 다른 입자로 평가하였다. (Test_B) 표 1과 2 에서 각 평가에 사용된 입자의 1차 및 2차 입자 size 와 이를 통해 계산된 AR 값을 나타내었고, 그림 1 에서 Test_B 에 사용된 입자들의 SEM image 를 나타내었다. 각 slurry 는 5wt% 의 abrasive 를 포함하도록 제조되었으며, $Fe(NO_3)_3$ 와 H_2O_2 가 산화제로 사용되었고, pH는 2.3 으로 고정되었다.

표 1. Test_A 에 사용된 입자 size 및 AR 값

	1차 입자 size (nm)	2차 입자 size (nm)	AR
A-1	19	29	1.53
A-2	12	23	2.92
A-3	66	193	2.93
A-4	36	71	1.97
A-5	35	55	1.57
A-6	29	78	2.69
A-7	72	122	1.69

표 2. Test_B 에 사용된 입자 size 및 AR 값

	1차 입자 size (nm)	2차 입자 size (nm)	AR
B-1	34	55	1.62
B-2	19	29	1.53
B-3	31	78	2.52
B-4	213	371	1.74

Abrasive size 와 shape 에 따른 RR 평가에서는 200hPa, 60rpm 의 공정 조건에서 모든 평가가 진행 되었으며, Preston 의 식에 대한 α , β 값을 구하기 위한 평가에서는 각 sample 에 대해 down pressure 및 platen speed 를 5가지로 split 하여 평가하였다. 압력에 대한 평가에서는 platen rotation speed 가 60rpm 으로 고정되었으며, 상대속도에 대한 평가에서는 carrier 의 down pressure 가 200hPa 로 고정된 채 진행되었다.

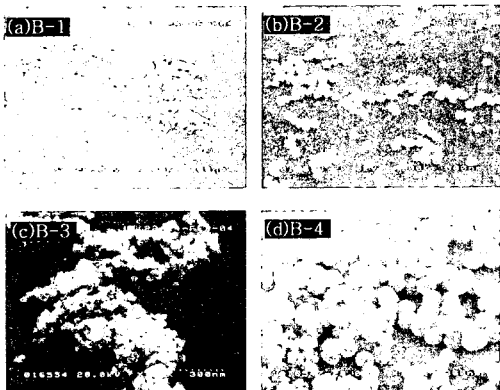


그림 1. Test_B 에 사용된 입자들의 SEM image

3. 결과 및 고찰

3.1. Abrasive 변화에 따른 RR 영향성

W CMP 의 제거 mechanism 에 있어, Paul⁶⁾은 그의 논문에서 $Fe(NO_3)_3$ 에 포함된 Fe^{3+} ion 에 의해 W 표면이 $FeWO_4$ 로 산화되고, H_2O_2 에 의해 WO_2/WO_3 막이 최종적으로 형성되고, 이렇게 생성된 산화막이 slurry 내에 포함된 입자 및 pad 에 의해 제거되는 과정이라고 하였다.

기존의 연구에서는 abrasive 의 size 변화가 RR 변화를 가져오는 주요 인자라 생각되어 왔다. Jairath⁷⁾는 size 증가가 RR 을 상승시킨다고 하였으며, Izumitani⁸⁾는 그와 반대로 size 가 작은 입자가 높은 제거량을 나타낸다고 하였다. Luo⁹⁾는 입자 정규 분포상의 standard deviation(σ) 값이 증가할 수록 높은 RR 을 나타낸다고 하였고, Mahajan¹⁰⁾은 Brown¹¹⁾의 논문을 인용하여 구체적으로 abrasive size 및 concentration 을 증가시켜가며 CMP 특성을 관찰하여 abrasive 에 의한 제거 mechanism 을 설명하였는데, indentation based model 과 surface area based model 이 그것이다. Indentation model 에서 RR 을 결정짓는 인자는 indent volume(V)이며, surface area model 에서는 contact area(A) 가 중요 인자라 설명 하였으며, V 와 A 는 입자 size 및 abrasive 농도와 식 (1)와 같은 관계를 가진다고 하였다.

$$\begin{aligned} A &\propto C_0^{1/3} \cdot \phi^{-1/3} \\ V &\propto C_0^{-1/3} \cdot \phi^{4/3} \end{aligned} \quad (2)$$

C_0 는 입자의 농도이며, ϕ 는 입자의 반경을 나타낸다. 이 논문에 의하면, sub-micron 단위의 작은 입자는 surface area based model 을 따르며, 큰 입자의 거동에서는 contact area model 이 적용된다고 하였다. 즉, micro 이하의 실제 CMP 에 적용되는 입자와 본 논문에서 거론된 입자들은 size 가 작아지면 surface area 가 증가하게 되고, 따라서 높은 RR 을 나타내는 surface area model 이 적용될 것으로 예상 되었다. 그림 2 에 Test_A 의 결과를 도식화하여 나타내었다.

그림 2(a) 는 1차 입자 size 변화에 따른 W 막질의 RR 변화이며, (b)는 2차 입자 size 에 따른 변화를 나타내고 있으며, (c) 는 aggregate ratio 에 따른 각 막질의 RR을 나타낸 graph 이다. 그림 2 의 결과에서 확인해 볼 수 있듯이, W 막질의 RR 은 입자의 size 에 의해 결정되기 보다 AR 값에 의해 결정됨을 알 수 있다. 1차 입자의 size 가 12nm 에서 79nm 로 증가하지만 오히려 W 의 RR 은 감소한다. 또한, 2차 입자 size 변화에 있어서도 23nm 에서 293nm 로 입자 size 가 10배 이상 증가하지만 RR 증가는 거의 없으며, 그 사이 측정치에서도 경향성을 찾을 수 없었다. 이러한 불규칙성은 AR 이 유사하고 size 가 다른 sample 에서도 마찬가지로 나타났다. 반면, 그림 2(c) 에서는 AR 증가에 따른 W RR 증가 경향을 확인할 수 있다.

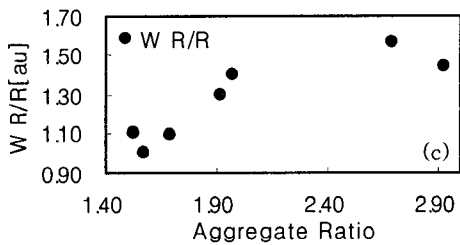
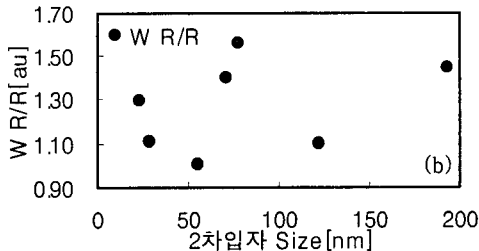
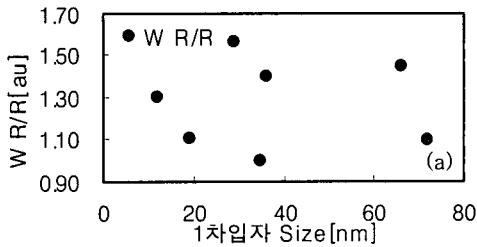


그림 2. 입자 size 및 AR 에 따른 W R/R

이러한 AR 과 RR 의 관계는 기존의 입자 size 가 RR 을 결정짓는다는 주장과 상반되는 것이며, 한 가지 이론으로 설명할 수 없다. AR 값의 증가는 contact area 의 감소와 indentation depth 의 증가를 동시에 유발시켜 복잡한 해석을 유도한다. 왜냐하면, 입자의 응집도 증가는 abrasive 와 wafer 간의 contact area 를 감소시켜 RR 을 낮춰줄 수 있는 반면, 응집에 따른 단위 면적당 압력의 증가는 indentation depth 의 증가를 가져와 RR 증가를 야기할 수 있는 상반된 작용이 예상되기 때문이다. 지금까지의 Test_A 결과로 볼 때, AR 증가에 따른 RR 증가 현상이 관찰되고, 따라서 contact area 보다 indentation depth 변화가 RR 값의 결정에 중요한 역할을 하는 indentation model 이 유효한 것으로 판단된다.

3.2. W 및 Ox 막질에 대한 P,V 공정 영향성

표 2 에 나타내어진 4가지 sample 을 이용하여 W 과 oxide 막질 CMP 에 대한 P, V 영향성을 평가하였다. 그림 3(a),(b) 는 down pressure 변화와 platen speed 변화에 따른 W RR 거동을 나타낸다.

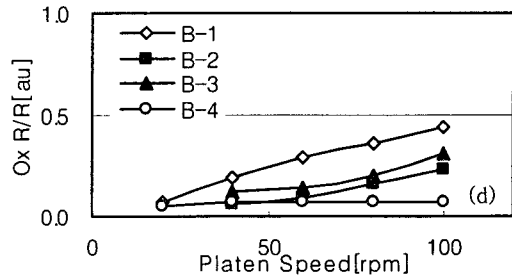
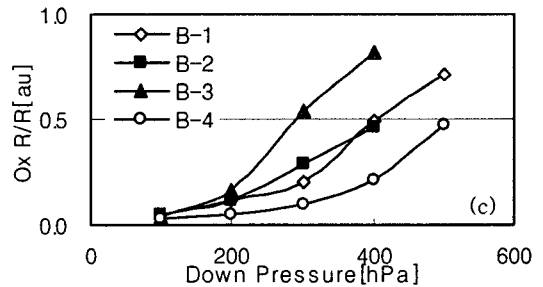
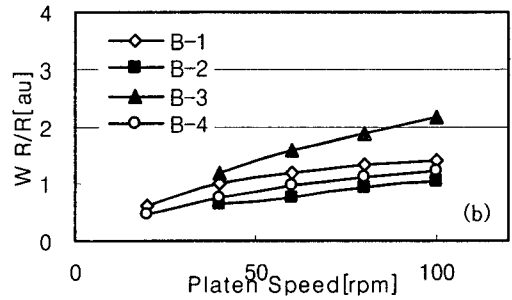
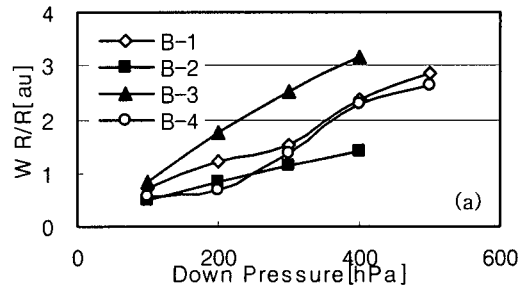


그림 3. 공정 조건(P,V) 에 따른 W 및 oxide RR

그림 3(a) 의 B-1 과 B-4 는 abrasive size 변화에 따른 거동을 나타내는데, 압력 및 속도 변화에 따라 매우 유사한 거동을 보인다. 한편, B-2 와 B-3 는 1 차 입자의 size 가 동일하지만 AR 이 1.5 와 2.5 로 차이 나는 sample 이다. 압력 증가에 대해 RR 차이가

커지지만, 압력 변화에 대해 동일한 양상을 보인다. W 막질에 대한 abrasive 별 α 는 그림 4 에서 볼 수 있듯이, 4개의 sample 에서 모두 0.9 ± 0.05 로 일정하게 나타남을 확인하였다. 이와 유사한 결과를 β 에 대해서도 확인하였다. 그림 4 에서 β 값이 0.57 ± 0.07 로 일정하게 나타난다. 이는 Wrschka⁴⁾ 가 제안한 변형된 Preston 식의 α 와 β 값이 abrasive 의 size 나 shape 에 영향을 받지 않는 고정된 값을 의미하며, 이 값은 Tseng²⁾ 이 그의 논문에서 normal stress 와 shear stress 항목을 contact area 개념을 이용하여 식 (1) 의 방정식에서 P 영향성(α) 이 5/6 이며, V 영향성(β) 은 1/2 이라 계산한 값과 거의 동일한 결과이다. 특히, 이 값이 oxide CMP 에 대해 계산된 값임에도 불구하고 W CMP 의 data 와 일치하는 것은 주목할 만한 사실이다.

한편, 그림 3(c),(d) 에 나타난 oxide 막질에 대한 평가 결과는 abrasive 종류에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타난다. 그림 3(c) 에서 down pressure 에 따른 oxide RR을 표시하였는데, 4가지 sample 에서 α 값이 1.5~2.5 로 변화의 폭이 크다. 즉, 압력 변화에 따른 oxide 막질의 거동이 abrasive 의 size, shape 및 AR 의 변화에 따라 커다란 편차를 보여준다. 마지막으로, platen speed 에 따른 oxide RR 관계를 나타낸 그림 3(d) 에서도 각 sample 간에 상이한 거동이 나타났다. 입자 size 가 작은 B-1 의 경우, 속도 변화에 따라 급격한 RR 상승을 보이는데 반해, 입자 size 가 큰 B-4 sample 의 경우, 속도 증가에 상관없이 동일한 RR 을 유지하고 있다. 이는 속도 증가에 따라 단위 시간당 입자의 이동 경로가 길어져 RR 을 증가시킨다는 개념에 어긋난 결과로 더 많은 관찰이 필요하다.

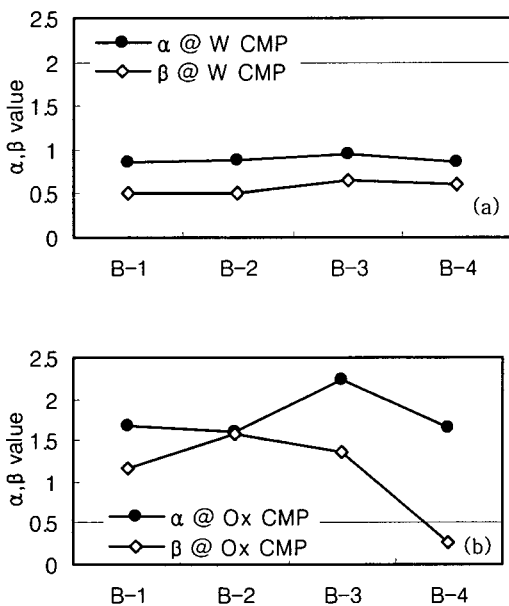


그림 4. W 및 oxide 막질에 대한 P, V 인자 영향성

이상의 결과에서 W CMP 공정의 주요 제거 막질로 사용되는 W 막질은 P, V 에 대한 의존성이 예상 가능하며 그 값은 abrasive 변화에 상관없이 일정한 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 반면, 강산성 pH 영역에서 낮은 RR 을 가져 stopping layer 로 사용되는 oxide 막질의 경우, 기존의 model 로 설명되지 않는 복잡한 RR 거동이 나타남을 알 수 있었다.

4. 결론

W CMP 공정에서 abrasive size 와 shape 에 의한 영향성 및 공정 변수 P, V 에 대한 영향성을 살펴 보았다. W 막질의 RR 은 입자의 size 에 의존적이라기보다 입자의 응집도(AR)에 의존적임을 알 수 있었다. 또한, 공정 변수 P, V 에 따른 거동 평가를 통해 주요 제거막질의 거동은 예상 가능하며 일정한 값이 나오는 반면, 주변막질로 사용되는 oxide 에 대한 거동은 예상치와 큰 차이를 나타내었다.

참고 문헌

- [1] F.W.Preston, *J.Soc.Glass.Technol.*, 11,214(1927)
- [2] W.T.Tseng and Y.L.Wang, *J.Electrochem.Soc.*, 144,L15,(1997)
- [3] Q.Luo, S.Ramajaran, and S.V.Babu, *Thin Solid Films*, 355,160,(1998)
- [4] P.Wrschka, J.Hernandez, Y.Hsu, T.S.Kuan, G.S.Oehrlein, H.J.Sun, D.A.Jansen, J.King, and M.A.Fury, *J.Electrochem.Soc.*, 146,2689,(1999)
- [5] M.Bielmann, U.Mahajan, and R.K.Singh, *Electrochem. And Solid-State lett.*, 2, pp. 401-403,(1999)
- [6] E. Paul, *J.Electrochem.Soc.*, 148(6) G359-G363,(1999)
- [7] R.Jairath, M.Desai, M.Stell, R.Tolles, and D.Scherber-Brewer, *Mater.Res.Soc.Proc.* 337, Pittsburgh,PA,p121,(1994)
- [8] T.Izumitani, *Treatise on Materials Science and Technology*, eds. M. Tomozawa and R.Doremus, Academic Press.New York,p 115,(1979)
- [9] J.Luo and D.A.Dornfeld, *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.*, 16,(2003)
- [10] U.Mahajan, M.Bielmann and R.K.Singh
- [11] N.J.Brown, P.C.Baker and R.T.Maney, *Proc.SPIE* 306,42,(1981)