

패턴 웨이퍼의 화학기계적 연마시 패턴 밀도의 영향과 모델링에 관한 연구

홍기식*, 김형재**, 정해도***

A Study on the Effect of Pattern Density and it's Modeling for ILD CMP

Gi Sik Hong*, Hyung Jae Kim**, and Hae Do Jeong***

ABSTRACT

Generally, non-uniformity and removal rate are important factors on measurements of both wafer and die scale. In this study, we verify the effects of the pressure and relative velocity on the results of the chemical mechanical polishing and the effect of pattern density on inter layer dielectric chemical mechanical polishing of patterned wafer. We suggest an appropriate modeling equation, transformed from Preston's equations which was used in glass polishing, and simulate the removal rate of patterned wafer in chemical mechanical polishing. Results indicate that the pressure and relative velocity are dominant factors for the chemical mechanical polishing and pattern density effects on removal rate of pattern wafers in die scale. The modeling is well agreed to middle and low density structures of the die. Actually, the die used in Fab. was designed to have an appropriate density, therefore the modeling will be suitable for estimating the results of ILD CMP

Key Words : CMP(화학기계적연마), ILD(층간절연막) CMP, Pattern Density(패턴 밀도), Die(다이), Structure(스트럭처)

1. 서론

총래의 진공관 시대로부터 개체 소자의 시대로 돌입한 이래, 반도체 기술은 급속한 발전을 이루어 왔다. 집적회로(IC), 대규모집적회로(LSI)에 이어 VLSI, ULSI 디바이스로의 발전이 그것이다. 이러한 고성능 디바이스화는 소자의 고집적화, 고기능화와 다층 배선 기술 등의 복잡한 3차원 구조로의 발전을 요구하고 있다.

이러한 반도체 디바이스는 연마 가공된 평면 웨이퍼 상에 구성되는데, 완전 평활면의 실리콘 웨이퍼(Si wafer) 상에 미세 패턴을 형성하여 디바이스를 제조하는 경우에는 Fig. 1과 같이 항상 요철이 존재하게 된다.

이러한 요철은 웨이퍼와 마스크 사이에 간격의 불균일성을 초래하고 투영렌즈의 초점심도의 한계를 넘는 등, 원하는 패턴 정밀도를 얻을 수 없게 되는 원인이 된다. 웨이퍼 상의 미세 패턴이 갖는 요

2001년 8월 7일 접수

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

*** 부산대학교 기계공학부

철을 최초의 완전 평활면과 같은 수준으로 하기 위한 광역평탄화(global planarization) 기술은 1990년 이래 급속히 부상해온 기술이다.

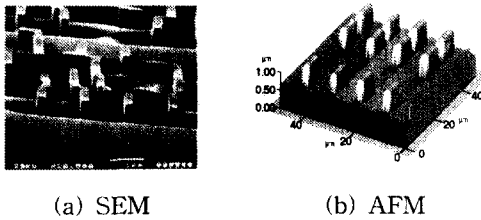


Fig. 1 Micro-unevenness on the device wafer

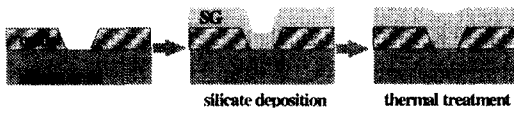


Fig. 2 Planarization technique : SOG

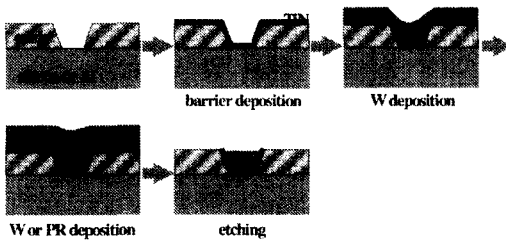


Fig. 3 Planarization technique : etch-back

평탄화 기술로는 Fig. 2, 3과 같이 Re-flow, SOG, Etch-back 등 다양한 기술이 있는데, 그 중에서도 가장 많이 사용되고 있는 기술은 1980년대 IBM이 개발한 화학기계적 연마법(CMP : Chemical Mechanical Polishing)이다.

화학기계적 연마법은 다층, 고집적 반도체의 배선공정에 필수적으로 적용되는 평탄화 공정기술이다¹⁾. 이 연구에서 대상으로 하는 화학 기계적 연마법은 Fig.4와 같이 웨이퍼를 헤드에 부착하여 패드 표면에 눌러 압력을 가하고, 패드와 웨이퍼가 동시에 동일 방향으로 회전하면서, 패드와 웨이퍼 사이에 연마입자가 현탁 되어있는 연마액인 슬러리를 공급하여 가공을 진행한다.

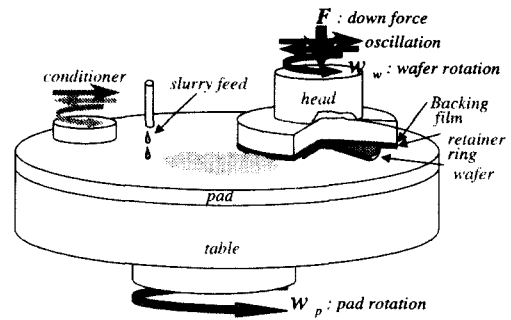


Fig. 4 Concept of conventional CMP

화학기계적연마에서는 여러 가지 인자들에 의해 영향을 받는데, 일반적으로 웨이퍼 스케일(wafer scale)에서는 웨이퍼와 패드사이의 상대속도와 가해진 압력, 슬러리의 화학적 조성, 슬러리 내의 연마입자의 종류 및 사용하는 패드의 물성 등이 영향을 미친다.

웨이퍼 스케일에 영향을 미치는 상기의 인자 이외에도 다이 스케일(die scale)에서는 패턴 밀도(pattern density)에 영향을 받아, 패턴 웨이퍼 연마 결과에서는 각 다이(die) 또는 스트럭처(structure) 별로 다른 연마 특성을 나타내게 된다.

이러한 패턴 밀도의 영향을 고려하기 위해 실제의 마스크 설계시 연마품위를 향상시키기 위해 적당한 더미(dummy) 패턴을 사용하기도 하는데, 모델링을 통해 적당한 패턴 밀도를 결정해주는 것은 배선 및 더미의 형태를 설계하고 마스크를 제작해서 실험한 데이터를 피드백 하여 다시 마스크를 제작하는 시행착오를 줄여 마스크 설계 효율 상승 및 공정단축의 장점을 갖는다.

2. 모델링 이론

일반적으로 블랭킷 웨이퍼(blanket wafer)의 연마율은 식(2-1)과 같은 프레스턴 방정식(Preston's Equation)을 따르는 것으로 알려져 있다^{1),2),3)}.

$$\frac{dh}{dt} = k_p P \frac{ds}{dt} \quad (2-1)$$

Fig. 5에서 실험에 사용된 패턴 웨이퍼의 간단한 측면도를 나타내었다. 실험에서 평탄화(global

planarization)가 되기 전에는 하부의 연마가 거의 일어나지 않았다. 그러므로 패턴의 상부(raised area)와 하부(recessed area)의 초기 두께를 h 라 할 때, 패턴의 하부에 대한 상부의 두께의 변화를 dh 라 하면, dh/dt 는 연마율(Removal rate, Å/min)이 된다.

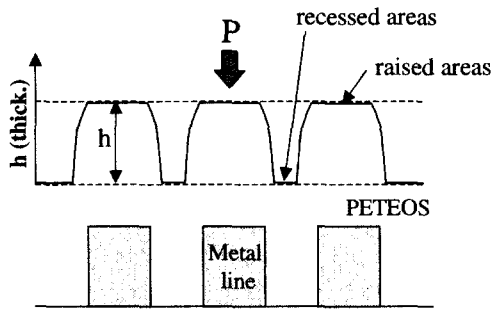


Fig. 5 The cross-sectional view of patterned wafer

프레스톤 상수 k_p 와 압력 P 및 속도 ds/dt 의 인자를 블랭킷 웨이퍼 연마율 K_b 와 유효밀도(effective pattern density) $\rho(x, y)$ 를 사용하여 식(2-2)와 같이 패턴 웨이퍼(patterned wafer)의 연마율을 예측하는 식으로 변형하였다^{4),5),6)7)}.

$$RR_{pattern} = k_p P \frac{ds}{dt} = \frac{K_b}{\rho(x, y)} \quad (2-2)$$

유효밀도 $\rho(x, y)$ 는 폴리싱 압력이 분포하는 국소영역을 잡기 위한 다이 내의 특정영역(검사창: Inspection window)의 패턴 밀도의 평균을 나타낸다. 이렇게 유효밀도가 계산되어지는 영역의 크기는 다이의 임의의 형태에 대한 프로세스 인자들에 의해 구해지는 고유의 값이다.

평탄화 길이는 프로세스 인자들에 영향을 받지만, 실제로는 패드의 기계적인 변형이 지배적인 영향을 미친다. 딱딱한 패드는 변형에 대한 저항이 강하기 때문에 넓은 영역에 걸쳐 압력이 분포되기 때문에 평탄화 길이가 크게 된다.

가장 단순한 경우, Fig. 6에서 보여지는 바와 같이, 다이의 유효밀도를 계산하기 위해 정사각형 검사창을 사용할 수 있다. 검사창의 중앙으로부터 동

일한 크기까지 계산된 유효밀도는 정사각형 검사창 내의 패턴의 솟은 부분의 비율(밀도)과 같다. 이러한 정사각형의 각 변의 길이를 평탄화 길이라고 정의한다⁶⁾.

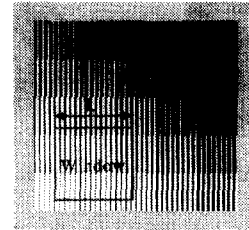


Fig. 6 Die layout and inspection window

그러나, 일반적으로 압력이 전사되는 형태는 가우시안(Gaussian) 분포 형태를 나타내므로, 정사각형 검사창 형태보다는 원형 검사창 형태가 압력 전사를 더 잘 표현할 수 있다. 본 모델링에서는 원형의 검사창 형태를 갖는 모델링을 사용하였고, 원형의 지름을 평탄화 길이로 정의하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험의 개요

실험에 사용된 연마장치는 Lapmaster사의 화학 기계적 연마장치인 LGP-381TM장비를 사용하였다. 사용된 패드는 상업용의 적층패드인 IC-1400TM (k-groove type)으로 매 실험마다 동일한 패드 상태를 유지하기 위해 연마공정 전 30초간 전착 다이아몬드 휠(#400)로 표면을 컨디셔닝⁹⁾하고 이물질의 제거를 위하여 나일론 브러시와 초순수를 사용하여 표면 세정 후 사용하였다.

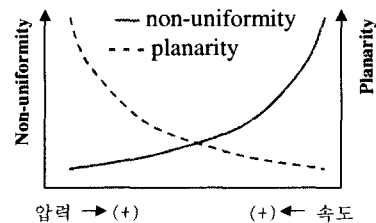


Fig. 7 The relationship between pressure & relative velocity and non-uniformity & planarity

일반적으로 Fig. 7과 같이 연마균일도(non-uniformity)와 평탄도(planarity)는 상대 속도와 압력에 지배적인 영향을 받는다. 평탄도와 속도 및 압력의 관계를 살펴보면 속도가 증가하면 패드가 패턴 하부까지 변형할 시간이 적어져 평탄도가 향상되나, 압력의 증가에 대해서는 패드가 패턴 하부까지 변형하게 되어 상부와 동시에 하부의 연마도 발생하게 되고 평탄도는 악화된다. 또한 연마균일도와 속도 및 압력의 관계는 속도가 증가하면 패드와 균일하게 접촉하기 어려워 연마균일도가 악화되고, 압력이 증가하면 패드가 웨이퍼 전면에 균일하게 접촉하게 되어 연마균일도가 향상하게 된다.

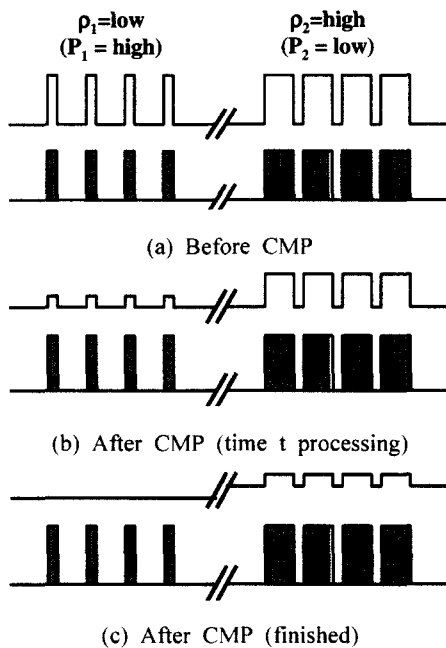


Fig. 8 Global-nonplanarity over different pattern density

또한 Fig. 8에서는 시간에 따른 패턴 웨이퍼의 화학기계적연마의 결과를 볼 수 있다. (a)는 연마전 웨이퍼의 표면에 요철이 존재하는 그림이다. 왼쪽 패턴은 밀도가 낮아 압력이 높게 작용하는 부분이고, 오른쪽은 밀도가 높아 압력이 낮게 작용하는 부분이다. (b)에서는 각 부분에 대해 작용하는 압력이 달라 연마율도 다르게 나타난다. 압력이 높게 작용한 왼쪽 부분은 연마가 빨리 일어나고, 압력이

낮게 작용한 오른쪽 부분은 연마가 천천히 일어나 결국 (c)와 같이 왼쪽 부분은 평탄화 되었지만 오른쪽 부분은 평탄화가 되지 않아 광역평탄화가 일어나지 않게 된다. 실험에서 사용한 패턴 웨이퍼는 다양한 패턴 밀도를 가지고 있다. 그러므로, 화학기계적연마 장비의 특성상 가압부의 압력 불균일로 인한 웨이퍼 스케일에서의 편차 뿐 아니라 패턴 밀도에 따른 다이 스케일에서의 편차 또한 발생하게 된다.

실험에서는 패턴 웨이퍼의 연마율과 평탄도를 확인하기 위해 압력과 헤드 및 테이블(head/table)의 속도에 대해 고려하였다. 압력은 150g/cm², 300g/cm²의 두 가지로, 헤드/테이블의 속도는 30/30rpm, 60/60rpm의 두 가지로 선정하였다. 연마시간(3분)과 슬러리 공급(200ml/min)은 고정하여 압력과 속도에 대한 평탄도와 연마율의 영향을 살펴보았다. 각 실험조건은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Experimental conditions	
Fixed conditions	Polishing time : 3min. Slurry feed rate : 200ml/min
Condition 1	Pressure: 150g/cm ² Head/Table speed : 30/30rpm
Condition 2	Pressure: 150g/cm ² Head/Table speed : 60/60rpm
Condition 3	Pressure: 300g/cm ² Head/Table speed : 30/30rpm
Condition 4	Pressure: 300g/cm ² Head/Table speed : 60/60rpm

각 조건에 대하여 2장의 블랭킷 웨이퍼와 5장의 패턴 웨이퍼를 사용하였다. 각 조건에 대한 블랭킷 웨이퍼의 연마결과는 패턴 웨이퍼의 모델링에 이용하여 패턴 웨이퍼의 연마율을 예측하고, 평탄화 길이(planarization length)를 구하는데 사용하였다. 웨이퍼의 사용순서는 Table 2와 같다.

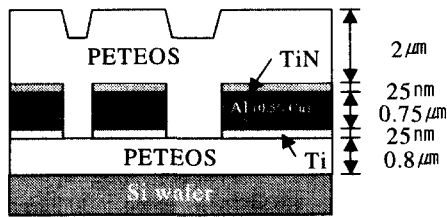
Table 2 Experimental proceeding

Blanket and pattern wafer conditions
Blanket 1ea → Pattern 2ea → Blanket 1ea → Pattern 3ea (total: Blanket 8ea, Pattern 20ea)

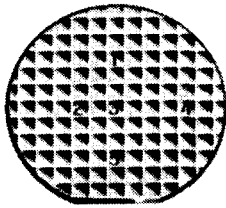
블랭킷 웨이퍼는 일반적인 측정방법에 따라 52점(point)을 측정하였으며, 패턴 웨이퍼의 모델링에 이용하기 위해 패턴 웨이퍼의 측정 위치와 동일한 위치의 5점을 추가로 측정하였다. 두께 측정은 Rudolph사의 ellipsometer인 AutoEL-III™를 사용하였다.

실험에 사용된 패턴 웨이퍼는 SKW1-1™ Dielectric Oxide CMP Characterization Wafer로 Fig. 9 (b)와 같다. 각 다이는 0~96%로 변하는 2mm×2mm의 스트럭처(structure)를 가지는 12mm×12mm 크기이며, 각 스트럭처는 250μm로 고정된 피치(pitch)의 배선(line)과 절연부(space)로 구성되어 있다.

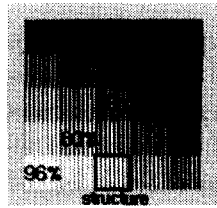
패턴 웨이퍼의 두께측정방법 및 위치는 Fig. 9와 같이 웨이퍼 레벨에서 5다이를 측정하고, 각 다이에 대해 4개의 스트럭처 (패턴 밀도는 각각 96%, 80%, 48%, 16%)씩, 모두 5다이 20점에 대해 측정하였다. 측정은 KLA-Tencor사의 UV1050™를 사용하였고, 표면 프로파일의 측정은 Taylor-Hobson사의 Form Talysurf Series 2™를 사용하였다.



(a) Cross sectional view



(b) Wafer Layout



(c) Die Layout

Fig. 9 Wafer & die layout and measuring points

모델링에서 블랭킷 웨이퍼의 연마율을 이용할 때 52점에 대한 측정결과 연마율 값은 평균값이기 때문에 각 다이에 대한 연마균일도 영향을 고려하

기 어렵다. 그래서 52점의 연마율 값을 이용하기보다는 실제 패턴 웨이퍼의 연마 후의 연마균일도 영향을 반영할 수 있는 블랭킷 웨이퍼의 5점 측정결과 연마율 값을 사용하여, 패턴 웨이퍼의 연마율을 예측할 때 발생할 수 있는 계통오차를 줄일 수 있었다.

3.2 모델링 방법

각 조건에 대해 Table 2의 웨이퍼 사용순서에 따라 실험을 행하고, 블랭킷 웨이퍼의 측정결과와 패턴 웨이퍼의 측정결과를 비교하였다.

블랭킷 웨이퍼의 연마율과 임의의 검사영역 크기에 대한 유효밀도 $\rho(x, y)$ 를 구해 식(2-2)에 대입시켜 얻은 예측된 패턴 웨이퍼의 연마율과 실제 패턴 웨이퍼 연마율 오차값(RMSE)이 최소로 되는 유효밀도와 검사영역의 크기를 구하였다. 이 유효밀도와 검사영역의 크기를 기준으로 같은 조건의 다른 패턴 웨이퍼에 식(2-2)를 사용하여 패턴 웨이퍼의 연마율을 모델링하였다.

또한 Fig. 10과 같이 실제 패턴 웨이퍼의 연마율과 예측된 연마율 사이의 오차값이 최소로 되는 검사영역의 크기를 평탄화 길이로 구해, 각 조건에 대한 평탄도를 평가하였다⁷⁾.

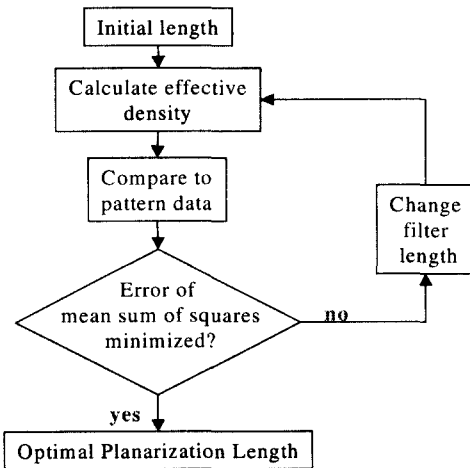


Fig. 10 Determination of Planarization Length

또한, 모델링한 연마율과 실제의 연마율 사이의

오차값을 구해 모델링의 정확성을 RMSE(Root Mean Square Error)값으로 평가하였다.

4. 실험결과 및 고찰

일반적으로 연마율은 압력과 속도가 증가함에 따라 높아진다고 알려져 있다¹⁰⁾. 블랭킷 웨이퍼와 패턴 웨이퍼의 연마결과에서 속도와 압력이 커짐에 따라 연마율이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 패턴 웨이퍼의 결과에서는 패턴 밀도가 연마율에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

또한 압력과 속도는 연마균일도에도 영향을 미치는데, 일반적으로 속도가 감소하거나 압력이 증가하면 연마균일도가 좋아지고 속도가 증가하거나 압력이 감소하면 연마균일도는 떨어지는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 실험인자의 변화에 대해 블랭킷 웨이퍼와 패턴 웨이퍼의 연마결과에서 이러한 경향성을 살펴보았다.

4.1 블랭킷 웨이퍼의 연마율

Fig. 11은 각 조건에 따른 블랭킷 웨이퍼의 연마율이다. 연마율은 압력과 속도의 증가에 따라 증가함을 볼 수 있다. 이는 화학기계적연마에서 기계적 인자의 영향이 증가하여 전체의 연마작용이 상승하여 연마율이 높아졌음을 알 수 있다.

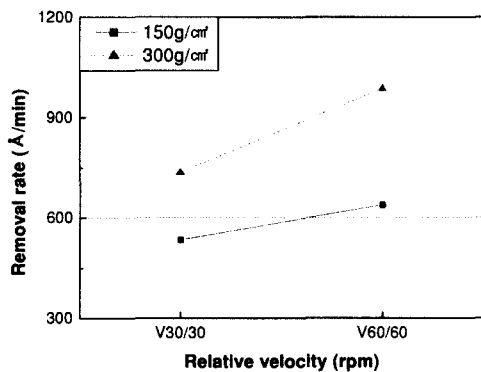


Fig. 11 Removal rate of blanket wafer

또한 Fig. 11에서 속도의 증가에 비해 압력의 증가가 연마율에 더 큰 영향을 미치는 일반적인 경향을 볼 수 있다. 이것은 압력의 증가가 속도의 증가

에 비해 패드의 직접적인 접촉을 더 원활히 하여 절연막 층의 수화반응을 높이면서 기계적 작용을 높여 더 높은 연마율을 보이는 것으로 생각된다.

4.2 패턴 웨이퍼의 연마율

패턴 웨이퍼의 연마결과는 패턴 밀도에 대해 큰 영향을 받는다. Fig. 12와 13은 각각 패턴 웨이퍼의 연마 전과 후의 표면 프로파일이다.

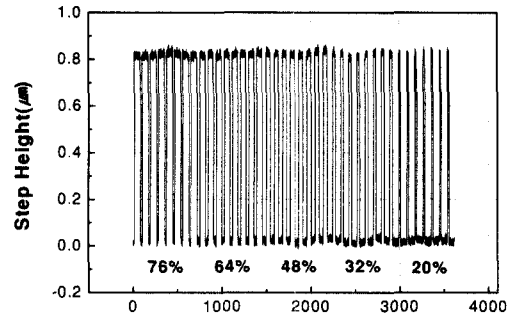


Fig. 12 Thickness profile of patterned wafer before CMP

Fig. 12에서 연마공정 전 패턴 웨이퍼의 절연막 층은 동일한 단차(step height)를 가지고 있으나 Fig. 13과 같이 연마공정 후 패턴 웨이퍼의 절연막 층은 패턴 밀도에 따라 단차가 다르게 나타난다.

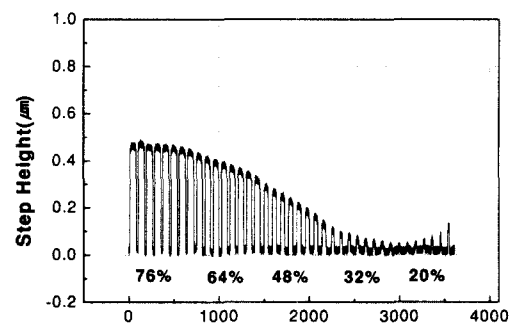
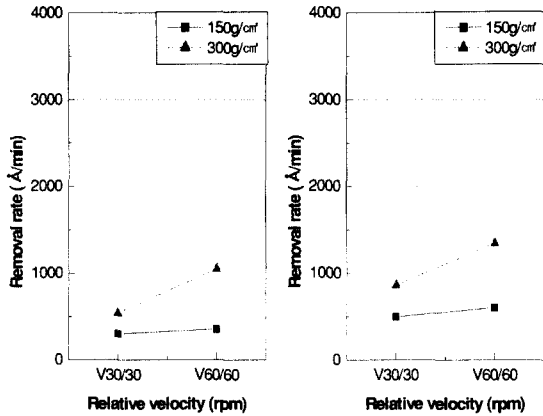


Fig. 13 Thickness profile of patterned wafer after CMP

이는 낮은 밀도(20%) 영역이 높은 밀도(76%) 영역에 비해 실질적면적이 낮기 때문에 연마시 높은 압력을 받기 때문에 패턴 밀도가 낮은 영역이 높은 연마율을 보이고 패턴 밀도가 높은 영역이 낮은 연마율을 보여 밀도가 다른 각 스트러처 별로 다른

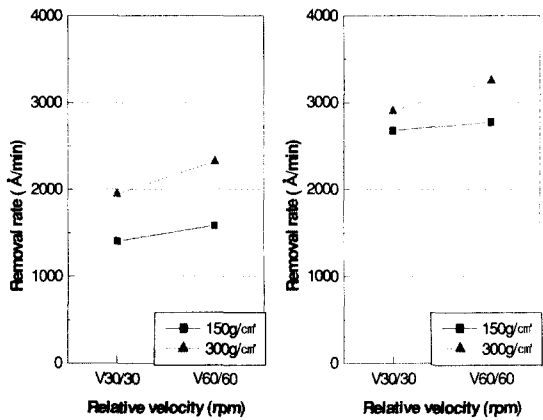
연마율을 보인다.

Fig. 14는 압력과 속도의 변화가 패턴 웨이퍼의 연마율에 미치는 영향을 각 밀도별로 나타낸다. 전술한 바와 같이 압력과 속도는 화학기계적연마에 지배적인 인자이며, 패턴 웨이퍼의 화학기계적 연마에서는 패턴 밀도가 중요한 인자라는 것을 실험의 결과에서 확인할 수 있었다.



(a) 96%

(b) 80%



(c) 48%

(d) 16%

Fig. 14 Removal rate of pattern wafer for pressure and relative velocity

4.3 평탄화 길이(planarization length)

일반적으로 평탄화 길이는 프로세스의 많은 인자들에 영향을 받는다⁴⁾. 그러나 패드의 기계적인

변형이 무엇보다도 지배적인 영향을 미친다. 실험에서는 패드를 상업용의 IC-1400™으로 한정하였으므로, 실험에 사용된 주 인자인 압력과 속도가 평탄도에 영향을 미치게 된다.

실험에서는 Fig. 15와 같이 속도의 증가에 대해 평탄화 길이 값이 증가하여 평탄도가 좋아지는 경향을 보이지만, 압력의 증가에 대해서는 평탄화 길이가 증가하여 평탄도가 악화되는 일반적인 경향과는 반대경향을 나타내었다.

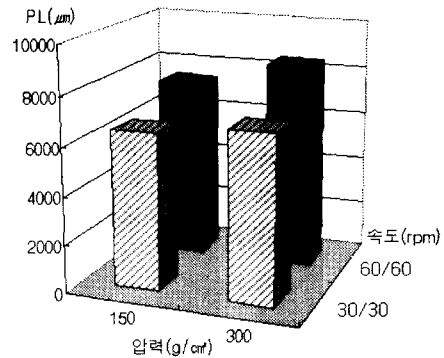


Fig. 15 Planarization length(μm) of conditions

이러한 경향은 평탄화 길이를 구하는 과정에서 발생한 오차로 생각되어진다. Fig. 10과 같이 평탄화 길이를 구하는 과정에서 압력과 속도가 낮은 조건에서는 실제 연마율과 예측된 연마율 사이의 오차값이 전체적으로 낮아 평탄화 길이 값이 적절하게 구해졌으나, 압력과 속도가 높아진 조건에서는 오차값이 다른 조건에 비해 크게 나타나 평탄화 길이 값의 신뢰도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 압력과 속도가 높은 조건에서는 평탄화 길이 값이 인자의 영향을 제대로 반영하지 못한 것으로 생각된다.

4.4 모델링 결과

Fig. 16은 실제 패턴 웨이퍼의 연마율과 예측한 연마율을 비교한 것이다. 총 20point에 대한 모델링 결과는 실제의 연마결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 다만, 패턴 웨이퍼의 연마 후 연마균일도의 영향을 받아 특정 다이 내의 값에서 오차를 가지는 것을 볼 수 있다.

또한 실제 패턴 웨이퍼의 연마율과 모델링한 연마율의 오차값으로 RMSE(Root Mean Square Error)=237.0Å/min을 얻을 수 있었다.

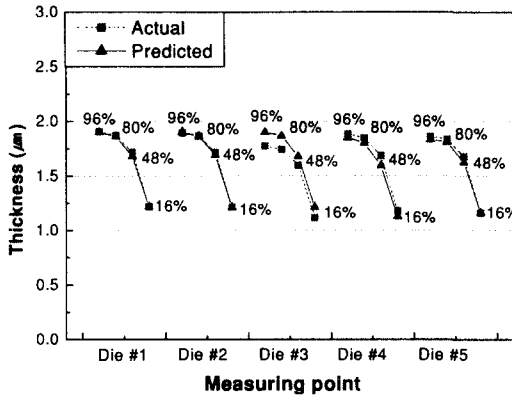


Fig. 16 Comparison of modeling results with actual results

5. 결론

본 연구에서는 화학기계적연마에서 패턴 웨이퍼의 다이 스케일에서 영향을 미치는 패턴 밀도의 영향을 분석하고 패턴 웨이퍼의 연마결과를 예측할 수 있는 모델링을 가정하여 실제 연마결과와 비교해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 웨이퍼 스케일에서는 블랭킷 웨이퍼의 연마율과 연마균일도에 대한 압력과 속도인자에 대한 영향을 비교하였다. 연마율은 속도에 비해 압력의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

(2) 다이 스케일에서는 패턴 웨이퍼의 연마율에 대한 패턴 밀도의 영향을 살펴보았다. 패턴 밀도는 각 스트럭처에 다른 압력을 작용하게 하여 밀도가 높은 영역은 낮은 연마율을 보이고, 밀도가 낮은 영역에서는 높은 연마율을 보였다. 이러한 패턴 밀도는 다이 스케일에서 측정되어야 할 중요한 인자라고 생각된다.

(3) 일반적으로 연마율에 영향을 미치는 압력과 속도 인자에 대해 블랭킷 웨이퍼와 패턴 웨이퍼의 연마결과를 비교하여 각 조건에 대한 모델링을 수행하였다. 각각의 실험조건에 대해 패턴 웨이퍼에 대한 연마결과를 예측하고 실제 결과와 비교하여 모델링의 일치여부를 확인, RMSE=237.0Å/min의 오차값을 얻을 수 있었다.

(4) 이러한 모델링을 사용하여 설계하고자 하는 마스크의 적절한 패턴 밀도를 고려, 연마 후 결과가 좋은 마스크의 설계에 적용 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 정해도, "차세대 반도체 제조를 위한 초정밀 가공 기술," 대한기계학회지, Vol. 36.3, p. 221, 1996.
2. F. Preston, "The Theory and Design of Plate Glass Polishing Mechanism," J. Soc. Glass Tech. Vol. 11, p. 125, 1927.
3. L. M. Cook, "Chemical Process in Glass Polishing," Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 120, p. 153, 1990.
4. B. Stine, D. Ouma, R. Divecha, D. Boning, J. Chug, D. Hetherington, C. R. Harwood, O. S. Nakagawa, and S. Y. oh, "Rapid Characterization and Modeling of Pattern Dependent Variation in Chemical Mechanical Polishing," IEEE Trans. on Semi, Manuf., Vol. 11, No. 1, pp. 129-140, Feb. 1998.
5. D. Boning, "Pattern Dependent Modeling for CMP Optimization and Control," pp. 2-6, 1999.
6. Shin Hwa Li, "Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing," ACADEMIC PRESS, New York, pp. 89-137, 2000.
7. Taber Smith, "Device Independent Process Control of Dielectric Chemical Mechanical Polishing," MIT, PhD Thesis, pp. 127-130, 1999.
8. Dennis Okumu Ohma, "Modeling of Chemical Mechanical Polishing for Dielectric Planarization," MIT, PhD Thesis, pp. 142-145, 1998.
9. 이성훈, 김형재, 정해도, "화학기계적연마(CMP) 컨디셔닝에 관한 연구," 한국정밀공학회지 제16권 5호, pp. 40-47, 1999.
10. Steigwald, J.M., Murarka, S.P., and Gutmann, R.J., "Chemical mechanical Planarization of Microelectronic Materials," John Wiley and Sons, p. 49, pp. 276-280, 1997.