

얇은 고무막 형태의 압력가변 연마헤드를 이용한 웨이퍼 평탄도 개선 방법에 관한 연구

이호철#

Planarization Uniformity Improvement by a Variable Pressure Type of the Polishing Head with the Thin Rubber Sheet

Hocheol Lee#

ABSTRACT

In this paper, a new polishing head with the variable pressure structure was studied to improve the planarization uniformity of the conventional template-metal head. Metal surface waviness and slurry distribution on the pad have been known to affect the polishing uniformity even in the synchronized quill and platen velocities. A polishing head with silicon rubber sheet was used to get a curved pressure distribution. In the experiment, the vertical deflection behavior on the pad was characterized with back pressure in the air chamber. Quill force increased linearly with backpressure. However, backpressure under a quill force made the upward movements of the quill. In the wafer polishing experiments, polishing rate and polishing thickness distribution were severely changed with backpressure. The best uniformity was observed with the standard deviation of 2.5% level of average polishing removal 215nm at backpressure 12.1kPa.

Key Words : Polishing head (연마 헤드), Planarization (평탄화), Backpressure (후방 공기압), Polishing rate (연마율), Polishing uniformity (연마 균일도)

1. 서론

미세가공 기술의 발전과 더불어, 패턴(pattern)을 가진 웨이퍼(wafer)를 광역 평탄화 할 수가 있는 기계화학적연마(chemical mechanical polishing, CMP)의 역할은 반도체 집적화 및 MEMS 구현을 위해 더욱 증대되고 있는 실정이다.¹⁻² 특히, 대화면 디스플레이(display) 용도의 대형 유리 웨이퍼나 미세광학(micro optics) 소자 제조공정에 있어서도 나노

(nano) 수준의 표면거칠기 및 평탄도 확보를 위해서 연마공정은 필수적인 공정이다.³⁻⁵ 이와 같이 우수한 평탄도와 표면거칠기를 얻기 위해서는 무엇보다도 안정된 CMP 공정 및 장치기술 확립이 중요하다. 한편, 초정밀 비구면 렌즈나 웨이퍼 등의 연마모델(model)은 연마패드(pad)와 연마 대상물 사이의 압력분포와 상대속도 분포에 의해 결정되는 방법이 이용되어 왔다.⁶⁻⁸ 그러나, 얇은 웨이퍼는 가장자리(edge)나 중심부에서 연마율이 균일

접수일: 2004년 10월 4일; 게재승인일: 2005년 1월 21일

교신저자: 한밭대학교 기계공학부 기계공학전공

E-mail hclee@hanbat.ac.kr Tel. (042) 821-1087

하지 않는 문제가 있어서, 에어백(airbag) 방식을 도입하여 강제적으로 연마 압력분포를 조절하여 이 문제를 해결하려는 노력이 있어 왔다.⁹⁻¹¹ 본 연구에서는 금속면 위에 부착된 템플레이트(template)에 웨이퍼를 장착하는 기존의 압력고정 연마헤드(head)를 멤브레인(membrane) 방식의 압력가변 연마헤드로 변경하는 연구를 하였다. 제작된 연마헤드의 특성을 평가하기 위해 로드셀(load cell)을 이용하여 패드 위에서의 변형 거동(behavior)을 측정하였다. 또한, 압력가변 연마헤드를 웨이퍼 평탄도 개선에 적용하기 위해서 웨이퍼를 각각 다른 후방 공기압(backpressure) 조건으로 연마하고, 연마된 두께분포를 측정하는 실험을 수행하여 연마헤드의 적용 가능성을 평가하였다.

2. 연마헤드 설계

2.1 연마장치

Fig. 1의 연마장치에서의 기존 연마헤드는 웨이퍼를 장착하는 캐리어(carrier)인 템플레이트를 알루미늄 금속면에 붙여서 사용하는 방식이다.

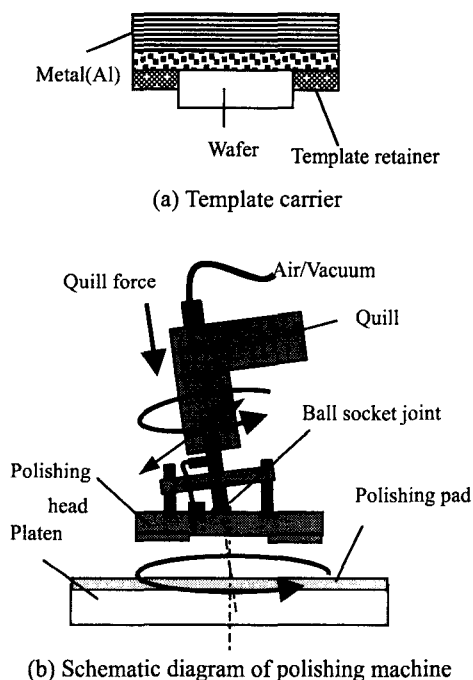


Fig. 1 Polishing machine with template carrier

템플레이트 캐리어는 연마패드와 유사한 폴리머(polymer) 패드 위에 리테이너(retainer)를 부착하고 있는 형태로 Fig. 1(a)와 같이 구성되어 있고, 회전력 전달과 웨이퍼 이탈 방지 기능을 가지고 있다. 퀴ل(quill)은 Fig. 1(b)와 같이 연마헤드를 공기압으로 누르면서 회전 또는 이송 운동을 하는 연마 헤드 위의 기계 구조부를 의미한다. 연마헤드는 퀴ل 내부의 모터 회전축에 연결되어 강제 회전이 가능한 구조로 되어 있다. 퀴ل 내부는 중공축이 있어서 필요한 경우에 연마헤드까지 공기 주입이나 진공을 공급할 수 있는 구조를 가지고 있다. 연마헤드는 볼소켓조인트(ball socket joint)에 의해 자동 조립되어지고 퀴ل에 의해 가압력을 받고 있다. 그러나 연마패드부의 수직축과 연마헤드의 수직축이 일치하지 않는 경우, 웨이퍼가 연마과정 중에 템플레이트 캐리어로부터 이탈하는 문제가 발생하기도 한다. 또한, 금속면에서의 템플레이트 부착 방식은 연마 압력분포가 금속면의 평면도에 의존하고 템플레이트 탈착에 따라서 금속 표면이 훼손되기도 한다.

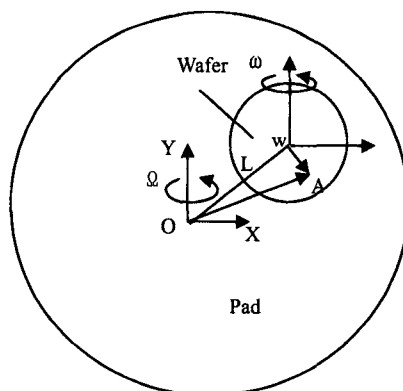


Fig. 2 Relative velocity diagram between wafer and pad rotation

한편, 웨이퍼의 연마 제거율 dh/dt 은 연마 패드에 가해지는 압력 P 와 연마패드와 웨이퍼의 상대속도 V 에 대한 프레스턴(Preston) 식으로 주로 표현되며 다음 식 (1)과 같다. k 는 연마입자 등에 의해 결정되는 비례 상수이다.

$$\frac{dh(x,y)}{dt} = kP(x,y)V(x,y) \quad (1)$$

웨이퍼 내의 임의점 A 의 상대속도는 연마패드

와 웨이퍼의 상대속도의 차에 의해 구해지며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \vec{V} &= \vec{V}_{WA} - \vec{V}_{OA} = \vec{WA} \times \vec{\omega} - \vec{OA} \times \vec{\Omega} \\ &= \vec{WA} \times \left(\vec{\omega} - \vec{\Omega} \right) - \vec{L} \times \vec{\Omega} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, V_{WA} 와 V_{OA} 는 웨이퍼의 회전각속도 ω 와 패드의 회전각속도 Ω 에 의해 각각 발생하는 속도이다. 따라서, 웨이퍼 영역내의 상대속도는 연마패드와 연마헤드의 두 회전각속도를 같게 둬므로써, 연마영역 내에서는 동일한 상대속도 $L\Omega$ 를 얻을 수 있다. 즉, 웨이퍼와 연마패드 사이의 압력 분포가 영역 내의 위치에 관계없이 일정하다면, 웨이퍼의 모든 영역 내에서 균일한 연마율을 얻을 수 있다. 그러나, 접촉역학(contact mechanics)의 관점에서 연마영역 경계인 웨이퍼 가장자리는 불연속적인 경계를 가지고 있고 압력분포는 평탄하지 않다.¹² 또한, 연마 입자들이 연마 영역의 중심부로 진입하는데 어려움이 있고, 이것은 연마영역 내에 불균일한 연마율을 발생하는 하나의 원인이 된다. 불균일한 압력분포를 최대한 억제하기 위해 웨이퍼와 템플레이트 두께차를 줄이고자 하여도 템플레이트 제작오차로 인해서 두께차를 허용할 수 밖에 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 금속면과 템플레이트에 의해 고정된 압력분포가 아니라, 가변의 압력분포를 능동적으로 연마헤드에 부여함으로써, 균일한 연마량을 웨이퍼 내에서 얻는 방법을 제시한다. 즉, 템플레이트 후방에 비어있는 포켓(pocket)을 만들고, 이곳까지 공기를 중공의 회전축을 통해서 전달한다. 결국, 공기 압력을 압력계에 의해 제어하면서, 가변의 압력 분포를 줄 수 있는 후방공기압 방식의 연마 헤드 구조를 시도하였다. 제안된 방식의 얇은 고무막 형태의 압력 가변 연마 헤드에 의해 웨이퍼와 연마패드 사이에 발생하는 압력분포는 접촉역학에 의해서 식 (3)과 같이 종형(bell shape)으로 표현될 수 있다.¹³

$$P(x, y) = P_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^2 \quad (3)$$

P_0 는 연마영역 중심에서 최고압력 값이다.

2.2 압력가변 연마헤드 설계

웨이퍼 캐리어를 포함한 연마헤드 기구는 두께 1mm 이하의 얇은 웨이퍼에 마찰력을 전달하면서도 웨이퍼 이탈 및 요동(wobble)이 없는 구조가 필요하다. 따라서 회전력과 압력을 주기 위한 방법과 리테이너 구조 등에 따라서 다양한 형태의 연마 헤드가 제안될 수가 있다. 웨이퍼 장착과 연마 헤드 회전, 압력 부가 방법에 따라 연마헤드 구조를 Table 1과 같이 분류하였다.

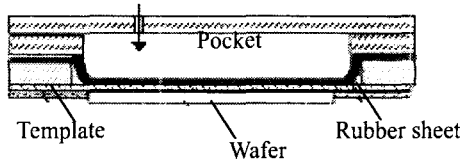
Table 1 Types of polishing head

Classification	Type	
Wafer carrier	Wax bonding	
	Surface tension (template)	
	Vacuum suction	
Quill and carrier connection	Single ball socket joint	
	Gimbals joint around head	
Applied pressure	Quill air pressure with a conventional template	
	Membrane structure - retainer pressure and wafer pressure	Same pressure
		Separated retainer and wafer pressure

연마장치에 사용되어 왔던 기존의 연마헤드는 Fig. 1에서와 같이 템플레이트 캐리어, 볼소켓조인트와 두개의 회전전달 기둥(bar)으로 이루어져 있었다. 본 연구를 위해 설계된 연마 헤드는 웨이퍼가 장착되는 템플레이트의 뒷부분을 비워 있는 포켓 모양으로 만들어 그 곳에 공기를 공급하여 압력을 조절하는 구조를 채택하였다. Fig. 3과 같이 템플레이트 바깥의 리테이너는 킬로부터 가압력을 받고 웨이퍼는 내부의 후방공기압에 의해 연마압력이 조절되는 방식이다. 웨이퍼 부분의 템플레이트 뒤에는 탄력적으로 늘어날 수가 있는 고무막이 있다. 공기가 공급되면 고무막은 템플레이트 후방에 밀착되어 웨이퍼에 압력분포를 전달하는 이중 구조이다.

설계 초기에 템플레이트 없이 고무막에 직접 웨이퍼를 장착하고 고리 형태의 리테이너만을 이용하여 웨이퍼를 외주에서 고정하는 방법을 시도하였다. 그러나, 고무막과 웨이퍼의 밀착성이 약해서 연마 중에 웨이퍼가 이탈하는 경우가 발생하였다. 따라서, 고무막 위에 템플레이트를 겹치게 하

여, 웨이퍼 회전 및 장착은 템플레이트가 담당하고, 압력분포는 고무막을 통해서 간접적으로 웨이퍼에 전달되는 구조로 변경하였다. 고무막의 두께는 0.76mm, durometer 30A의 것을 사용하였다. 후방공기압 조절을 위해 최대 공급압력 206.9kPa의 범위를 가진 압력계를 사용하였었고, 실험에서는 3.45 ~ 34.5kPa의 낮은 범위에서만 사용되었다.



(a) Section view of the head design

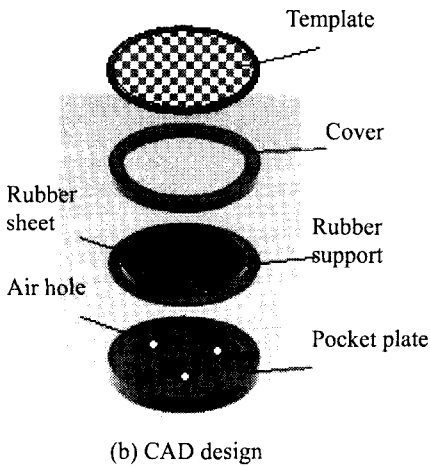


Fig. 3 New polishing head design

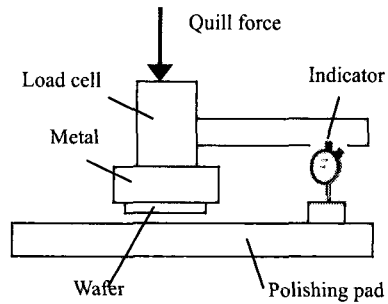
3. 연마헤드 적용 및 실험 결과

제작된 연마헤드를 평탄도 실험에 적용하기 위해서는 퀴일의 가압력(quill downward force), 고무막에 대한 후방공기압의 설정 조건에 대한 정보가 먼저 필요하였다. 적절한 퀴일의 가압력과 후방공기압에 의해서 웨이퍼는 변형된 연마 패드 속으로 들어가고 안정적인 연마를 받게 된다. 그러나, 퀴일에 과도한 가압력을 주면 웨이퍼를 수평방향으로 지지하는 템플레이트의 리테이너 부분이 패드에 닿아, 불규칙한 진동 등의 문제점을 야기할 수도 있다. 퀴일 가압력은 연마 장치의 컨트롤(control) 패널(panel)에 있는 퀴일 압력계(quill pressure gage)에 연결된 에어실

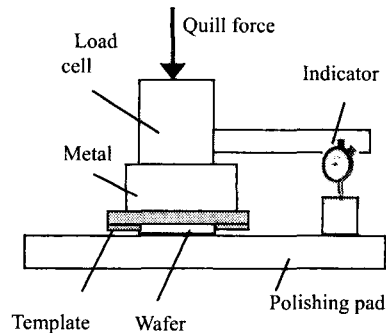
린더(cylinder)의 압력에 의해 설정되므로, 정확한 가압력을 알기 위해 로드셀을 설치하여 압력계의 값과 가압력을 비교하였다.

3.1 가압력과 패드 변형 측정

가압력 측정을 위해서 Fig. 4(a)와 같이 퀴일 아래에 로드셀을 두었다. 로드셀과 패드 사이에는 4inch(100mm) 웨이퍼들을 겹쳐 두고, 압력계의 압력에 따른 가압력 변화를 로드셀을 이용하여 측정하였다.



(a) Case 1: deflection test without template



(b) Case 2: deflection test with template

Fig. 4 Pad and template deflection test under quill force

압력계의 압력 증가에 따라 로드셀 가압력은 Fig. 5에서와 같이 거의 선형적인 관계를 보였다. 웨이퍼에 작용하는 실제의 연마 압력은 로드셀 측정값과 웨이퍼 면적에 의해 구할 수가 있다. 퀴일 압력계 설치치 17.3kPa(2.5psi)에서 가압력을 의미하는 로드셀 값은 31.75kgf이고, 4inch 웨이퍼에 작용하는 압력은 계산 결과 40.8kPa(5.92psi)으로 나타났다. 퀴일 압력계의 값은 로드셀에 의해 환산된

가압력 값으로 환산되어져 사용되어야 한다.

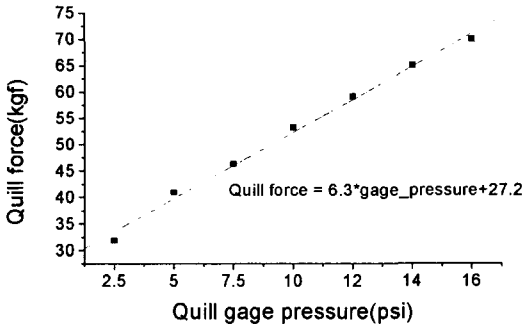


Fig. 5 Quill force by the quill gage pressure

한편, 킨 가압력에 의해 눌려진 웨이퍼가 패드 속으로 들어가는 양을 파악하는 것이 필요하다. 웨이퍼는 템플레이트 바깥으로 돌출해 있는데(웨이퍼 두께의 1/3정도) 사용되는 패드와 템플레이트의 종류에 따라서, 템플레이트의 리테이너 부분이 패드에 닿는 가압력은 달라진다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)와 같은 실험 배치로서, 연마 패드에 대해 상대적인 킨의 이동량을 인디케이터(indicator)로 측정하여 Fig. 6과 같이 표시하였다.

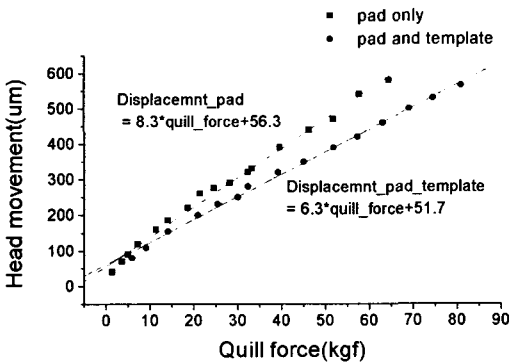


Fig. 6 Conventional polishing head movement to the pad by quill force

템플레이트가 없는 Fig. 4(a)의 실험에서, 킨 압력계 설정치 65.5kPa(9.5psi), 로드셀의 가압력 45.4kgf에서 440 μ m 만큼 패드가 변형되도록 4inch 웨이퍼가 눌려졌다. 4inch 웨이퍼에 작용하는 접촉 압력은 57.2kPa(8.3psi)이다. 동일한 압력계 설정에

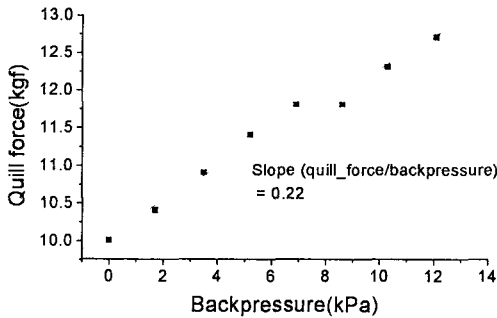
서, 템플레이트가 있을 때에는 350 μ m의 변형량을 보였다. 가압력 57.2kPa에서 템플레이트만의 변형은 90 μ m 이었다. 따라서, 연마패드와 템플레이트의 변형은 킨 가압력에 따라서 선형적으로 증가하며 탄성영역의 하중-변위 현상으로서 해석이 가능하다. 따라서, Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 이용하여 로드셀 없이도 웨이퍼 두께, 연마패드, 템플레이트 조건에 맞게 킨 압력계를 설정 가능하다.

3.2 압력가변 연마헤드의 거동

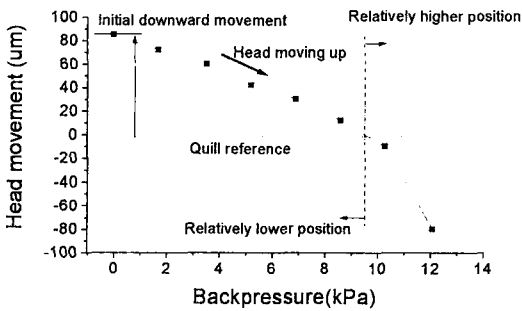
연마헤드의 특성 파악을 위한 실험 배치는 Fig. 4(b)와 거의 동일하였고, 후방공기압만을 별도의 압력계로 조절하였다. 먼저 후방공기압 없이, 연마헤드를 포함한 킨에 10kgf의 가압력을 주어 아래로 이동하게 하여 연마헤드가 웨이퍼를 누르도록 하였다. 가압력으로 인한 패드의 초기 변형의 결과로서, 연마헤드 하강량은 85 μ m이었다. 이것은 기존 연마헤드 경우의 110 μ m 보다 작은 값이다. 후방공기압이 없는 상태에서 웨이퍼는 신축성 있는 템플레이트와 함께 연마헤드 포켓(pocket or air chamber) 쪽으로 밀리는 현상을 보이는 것으로 추측된다. 연마헤드 이동 후, 후방공기압을 서서히 증가시키면서 연마헤드를 포함한 인디케이터로 킨의 거동을 측정하였다. 압력계에 의해 후방공기압이 12.1kPa(1.75psi)까지 증가하면 로드셀 가압력은 12.7kgf로 변한다. Fig. 7(a)은 후방공기압 증가에 따른 가압력 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 후방공기압의 증가량에 대한 가압력 상승의 기울기는 0.22(kPa/kgf)의 값을 나타내었다. 같은 실험 조건에서, 연마헤드가 장착된 킨의 거동을 인디케이터로 측정하여, Fig. 7(b)와 같은 결과를 얻었다. 킨 하강에 따라 연마헤드는 템플레이트를 통해서 웨이퍼를 패드에 대해 누르게 된다. 그리고, 이 상태에서 후방공기압을 증가시키면, 연마헤드 내에 있는 고무막이 늘어나 템플레이트에 밀착하고, 템플레이트 모양은 중형으로 변하게 된다. 일정크기 이상의 후방공기압은 웨이퍼에 전달되는 압력 분포를 중형이 되게 할 것으로 추정된다.

한편, 후방공기압이 계속 증가하면 연마헤드는 오히려 Fig. 7(b)에서와 같이 상승하였다. 즉, 후방공기압 10.3kPa(1.5psi) 부근에서, 기준 위치에 대한 이동량이 다시 0으로 되면서 제자리로 돌아오게 된다. 그리고, 10.3kPa(1.5psi) 부근 이후에는 급격하게 상승하는 모습을 보인다. 이것은 고무막과

템플레이트의 형태가 종형이 되면서, 연마헤드를 포함한 킴 부분이 전체적으로 상승하는 특이한 현상을 보이고 있다. 그리고, 얇은 웨이퍼는 일반적으로 수십 μm 정도 구부러져 있는 형태를 가지고 있다. 따라서, 일정수준 이상의 후방공기압을 가해 주어야만 웨이퍼가 연마패드에 균일한 압력으로 밀착될 것이다. 고무막이 늘어남에 따른 웨이퍼와 연마헤드의 거동을 해석적으로 분석하는 후속 연구가 안정된 공정 조건 확보를 위해 필요하다.



(a) Relation between quill force and backpressure



(b) Head movement

Fig. 7 New polishing head movement by quill force and backpressure

3.3 연마 평탄도 실험

후방공기압을 이용하는 압력가변 연마헤드의 평탄도 개선 효과에 관한 특성을 조사하기 위해 산화막(oxide layer) 웨이퍼를 이용한 연마 실험을 수행하였다. 산화공정(thermal oxidation)에 의해 4inch 실리콘 웨이퍼 위에 평균 두께 626nm의 산화막을 형성시켰다. 산화막의 두께 측정은 Nanospec/AFT를 이용하였고, 1% 이하의 우수한 산

화막 균일도(uniformity)를 갖고 있어서, 연마 전후의 형상을 관찰하기에는 적절하였다. 연마 슬러리는 Rodel ILD-1300을 사용하였고, 공급장치를 이용하여 연마패드에 슬러리가 주기적으로 떨어지도록 하였다. 연마헤드와 연마패드의 연마 회전속도는 동일한 각속도 50rpm으로 고정하였다. 격자홈의 연마패드와 두께 0.021inch(0.53mm)의 웨이퍼를 사용하였다. 웨이퍼 외주에서 웨이퍼를 잡고있는 템플레이트의 리테이너 높이는 0.016inch(0.41mm)의 것을 사용하였다. 연마실험 전후의 산화막 두께를 Fig. 8과 같이 4inch 웨이퍼 20곳에 대해서 측정하여 연마균일도를 평가하였다. 측정 순서는 웨이퍼의 중심 두께를 측정하고, 반경방향으로 15mm 이동 후, 원주방향으로 회전하면서 측정한 후, 다시 반경방향으로 15mm 이동하여 측정하는 것을 반복하였다. 웨이퍼 가장자리 측정 위치는 5mm 안쪽으로 두었다.

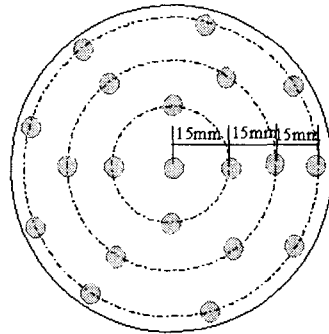


Fig. 8 Measurement locations of 20 points for the oxide wafer uniformity experiment

연마실험에서 연마헤드가 연마패드에 대해 약 85 μm 만큼 아래로 이동하도록 킴에 가압력을 주었다. 8.6, 10.3, 12.1, 13.8kPa의 후방공기압에 대해서 각각 3분 동안 연마를 실시하였다. 연마 후에 측정된 웨이퍼 산화막의 두께분포를 후방공기압에 대해서 Fig. 9에 나타내었다.

평균 연마율은 후방공기압 8.6, 10.3, 12.1, 13.8kPa에 대해서 각각 50.2, 61.4, 71.6, 75.2nm/min 이었다. 수평축은 웨이퍼의 중심으로부터 가장자리까지의 측정 위치이다. 후방공기압 8.6kPa에서 산화막의 두께는 안쪽보다 가장자리로 갈수록 낮아지는 분포를 갖고 있었다. 두께의 최대 최소차는 46nm이었고, 표준 편차는 14nm이었다. 후방공

기압을 증가시키면, 웨이퍼 중심 압력이 최대인 종형 압력분포가 될 것으로 추측되었는데, 연마된 산화막의 두께 분포도 또한 중심부가 낮아지고 가장자리가 높아지는 역전현상이 동일하게 관측되었다. 특히, 후방공기압 12.1kPa에서 연마 균일도가 가장 좋아지는 현상을 보였으며, 평균 연마량 214.8nm에 대하여, 최대최소차 22.3nm이었다. 표준편차는 5.3nm으로 연마량 대비 2.5%이었다. 그러나, 후방공기압 13.8kPa에서는 연마 두께분포가 급격하게 역전하는 현상을 보인다. 12.1kPa에서 2.5%의 우수한 표준편차의 균일도에도 불구하고, 후방공기압의 미세한 변화는 연마 두께 균일도를 악화시킬 수가 있음을 의미한다. 따라서, 균일한 연마 두께분포를 얻기 위해서는 후방공기압 크기의 변화에 연마율이 덜 민감한 압력가변 연마헤드 구조가 필요할 것으로 기대된다.

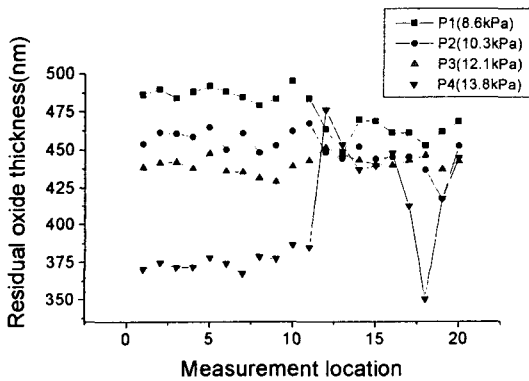


Fig. 9 Residual oxide thickness after 3 minutes polishing experiment under the different backpressures

4. 결론

본 논문에서는 고평탄도의 대형 웨이퍼를 얻기 위한 방법으로서 웨이퍼에 가해지는 압력분포를 능동적으로 가변할 수가 있는 연마헤드를 설계 제작하고, 우수한 평탄도를 얻기 위한 일련의 연마 실험 과정을 제시하였다.

- (1) 신축성 있는 고무막과 템플레이트 캐리어를 혼용한 압력가변 연마헤드를 설계 제작하였다.
- (2) 웨이퍼를 장착한 연마헤드를 킥 가압력으로 아래로 이동한 후, 후방 공기압을 증가시키면 웨이퍼와 패드는 접촉상태를 유지하면서

도 연마헤드 전체는 상대적으로 위로 다시 이동하는 현상을 보였고 안정된 연마를 위해서는 적정한 가압력과 후방공기압 설정이 필요하였다.

- (3) 후방공기압 증가는 웨이퍼에 가해지는 압력분포를 종형으로 변화시킬 수가 있고 연마량 분포를 조절 가능함을 실험으로 보였다. 초기 연마헤드 하강 이동량 85 μ m, 후방공기압 12.1kPa의 조건에서 연마량 표준편차 2.5% 수준의 균일도를 얻었다.
- (4) 보다 안정적이고 균일한 연마 두께분포를 얻기 위해서는 연마율이 후방공기압 크기의 영향에 덜 민감한 연마헤드 구조가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지역대학우수과학자 사업 (과제번호: R05-2004-000-12568-0)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Ryan, J. G., Geffken, R.M., Poulin, N. R., Paraszczak, J. R., "The evolution of interconnection technology at IBM," IBM Journal of Research and Development, Vol. 39, No. 4, pp. 371-381, 1995.
2. Singh, R. K., Bajaj, R., "Advances in chemical-mechanical planarization," MRS Bulletin, October, pp. 743-751, 2002.
3. Jang, J., Lim, S., Oh, M., "Technology development and production of flat panel displays in Korea," Proc. IEEE Vol. 90, No. 4, pp. 501-51, April 2002.
4. Lee, Hocheol, Miller, Michele, Bifano, Tomas G., "Chip-scale integration technique for a microelectromechanical system on a CMOS," J. KSPE, Vol. 20, No. 5, pp. 218-224, 2003.
5. Lee, Hocheol, Miller, Michele, Bifano, Tomas, "CMOS chip planarization by chemical mechanical polishing for a vertically stacked metal MEMS integration," J. Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, Jan., pp. 108-115, 2004.
6. Lee, Hocheol, Yang, Minyang, "Dwell time algorithm for computer-controlled polishing of small

- axis-symmetrical aspherical lens mold,” *Optical Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 1936-1943, 2001.
7. Hocheng, H., Tsai, H. Y., Tsai, M. S., “Effects of kinematic variables on nonuniformity in chemical mechanical planarization,” *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 1651-1669, 2000.
 8. Lee, E. S., Kang, J. H., Shin, Y. J., “Design and manufacturing of chemical mechanical polisher,” *Proc. KSPE*, pp. 951-954, June 1998.
 9. Melvin, J. W., Suh, N. P., “Axiomatic design of a chemical mechanical polishing wafer carrier with zoned pressure control,” *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, pp. 1-10, 2002.
 10. Wijekoon, K., Lin, R., Fishkin, B., “Tungsten CMP process developed,” *Solid State Technology*, April, pp. 53-56, 1998.
 11. Jaso, M., Glynn, T., Giunta, J., Diefenderfer, D., “Evaluation of an advanced wafer carrier for ILD planarization,” *Proc. Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, pp. 419-421, 2000.
 12. Lin, Y., Lo, S., “Finite element modeling for chemical mechanical polishing process under different back pressures,” *J. Material Processing Technology*, Vol. 140, pp. 646-652, 2003.
 13. Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, pp. 84-106, 1985.