개관

웨이퍼 면내의 연마균일성은 CMP 공정제어 및 출하제품의 품질검사와 관련하여 중요한 위치를 차지하고 있다. CMP 후 두께편차는 후공정(backend)의 안정성 뿐만 아니라 디바이스 수율에 미치는 영향이 막대한 것으로 알려져 있다.
CMP 전후 공정 또한 웨이퍼 두께분포에 영향을 미칠 수 있다는 사실이 증명된 바 있으나 일반적인 backend 제조공정에서 평탄화에 영향을 미치는 핵심공정은 CMP이다.

CMP 공정은 복잡한 radial두께편차 패턴을 야기한다. 국소 최대치와 국소 최소치에 의한 경우가 대표적인 데 그림 1은 이러한 평탄화 정도를 보여 준다. 그림 1은 CMP 공정을 전후하여 blanket 산화막에서 측정한 웨이퍼 두께 데이터를 나타낸 것이다.
CMP 공정 전의 경우 막(film)은 상당히 평탄하며 두께 표준편차는 전체 film두께의 1% 정도인 반면 CMP 공정 후에는 측정한 두께편차가 크게 벌어지고 있다.
연마속도(polish rate) 편차 물리특성은 만족스러울 만큼 규명된 것은 아니나 몇 가지 메커니즘, 이를테면 carrier와 연마패드에 의해 웨이퍼에 가해지는 하중에 의한 응력, 슬러리 이송 및 chemicals 작용효과, wafer carrier 및 연마정반(platen)의 상대동작 등은 생성되어 있다.

CMP 공정의 최적화/제어는 blanket film의 연마 결과치를 근간으로 하는 것이 보통이므로 대표성을 가진 정확한 film layer측정치를 얻는 것이 중요하다.
대부분 표준지역(standard area), 극선도(polar map), 표준배열(standard setup) 부분집합 또는 편차를 이용하여 측정이 이루어지고 있다.
또한 line이나 직경스캔(diameter scan)도 널리 이용되고 있는 방법이다. 이들 방법은 증착 및 에칭에 의해 생성된 film처럼 기본적으로 monotonic radial 두께편차를 지닌 film을 주로 핸들링하기 때문에 이들 방법을 CMP 공정에서 보통 얻을 수 있는 상당히 higher-order radial 두께편차에 적용할 경우 부적합한 경우가 허다하다.

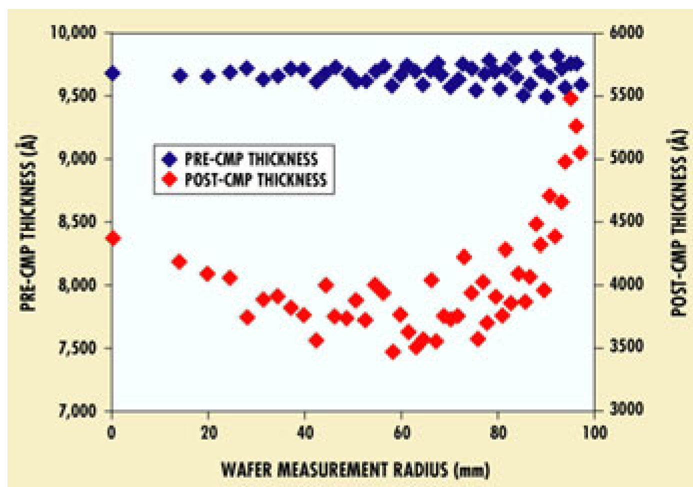

그림 1. CMP 공정 전후 웨이퍼 연마균일성을 나타내는 두께 데이터

그림 2는 위치선택법(site selection)에 의한 형상의 전형적인 예이다. 4개 map 모두 웨이퍼 전체적으로 지역평균측정치를 구현하고는 있으나 polar(a) / area(b) / radial(d) map 은 외견상 상당한 차이를 보여 주고 있다.

2a의 polar map에서는 중심점 및 이산(discrete) 웨이퍼 반경을 따라 정보가 모여 있다. area map(2b)의 점은 polar map의 점보다 상당히 고른 분포를 보이고 있으나 7개의 이산 반경을 따라 정보가 모여 있는 양상이다. polar pattern의 수정형태인 2c는 프로세스 성능 시험에 이용되고 있다. standard polar map과 마찬가지로 종합적인 radial 정보가 결여되어 있으며 등거리방위(azimuthal) 정보가 불완전하고 웨이퍼 중심쪽으로 치우친 절충형태이다.

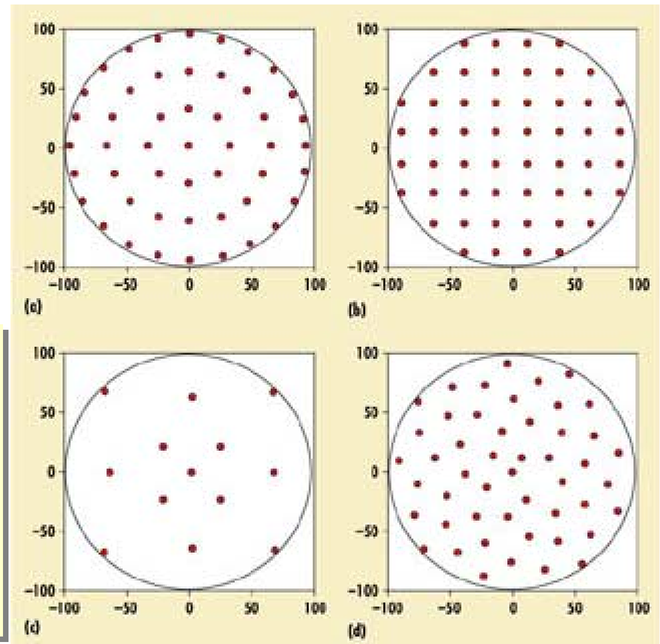

그림 2.
CMP 측정방식 중 지역선택방식(site selection)을 적용한 200mm 웨이퍼 형상 ;
(a) polar map, (b) area map, (c) 프로세스 성능시험용 49-point polar map의 부분집합도로 13개 site 측정을 목적으로 함, (d) radial 형상.
(x, y 좌표단위 : mm)

본 자료는 지역평균 site selection에 의한 radial 방식(2d)을 대안으로 제시하고자 한다. 이 방식을 적용할 경우 CMP 공정에서 일반적으로 관찰되는 웨이퍼 전면에 걸친 두께 편차 형상 포착이 가능하다. 종래의 site selection 방식과 비교하여 radial 방식에서 이용하는 웨이퍼는 산화막 / 금속 연마공정을 거친 것이며 프로세스 최적화 사례 연구도 제시하고 있다.

Radial 측정 형상 설계

여기서 제시하는 radial map은 수많은 점으로 이루어져 있으며 이 점은 동심 고리형태의 웨이퍼 지역을 나타낸다. 단 1개 점만이 이산된 각 고리형태의 점과 연관되어 있기 때문에 radial정보량의 극대화를 기할 수 있다.
또한 각 점은 같은 값을 갖는 지역과 연관되어 있으므로 측정치는 지역적 평균값과 같다. 이 밖에 radial map상의 점은 웨이퍼를 따라 회전하는 모양으로 배열되어 있기 때문에 등거리방위 해상도 극대화 구현이 가능하다.

radial방식을 이용한 site selection 설계는 다음과 같이 이루어진다. 웨이퍼 map이 1개의 중심점을 포함하여 총 n개 점으로 이루어진 경우 웨이퍼는 n개의 동일지역으로 분할되고 중심지역은 원이 되며 나머지 지역은 고리모양이 된다.
각 지역은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A_n = \frac{\pi(R_w - EE)^2}{n-1}$$

* Edge Exclusion : 측정에서 배제된 웨이퍼의 최외곽지역을 가리킨다. 200mm 웨이퍼에서 최외곽 측정점은 R = 95 mm일 때 edge exclusion은 5 mm이다.

여기서 R_w 는 해당지역의 웨이퍼 반경이고 *EE*는 edge exclusion목표치이다. 중심점을 제외하고는 각 점은 해당지역의 외곽 주변부에 배열된 다음 원점을 중심으로 회전한다. 그래야만 웨이퍼 전체 범위에 걸쳐 효율적인 표본추출이 가능하기 때문이다.등거리방위 지역의 경계선은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_i = \sqrt{\frac{i A_n}{\pi}} \quad (\text{단 } i = 1, n-1)$$

각각의 비중심점 위치는 다음에 의해 정의된다.

$$x_i = R_i \cos(i\theta),\ y_i = R_i \sin(i\theta) \quad (\theta = \text{회전각도})$$

그림 3은 13개 점으로 이루어진 map의 설계 프로세스를 보여주고 있다. 붉은 심볼들은 x 축위에 정렬된 모든 점들을 보여주고 있다. radial 측정형상은 그림 2d에서도 볼 수 있는 데 49개 점으로 이루어져 있으며 중심점을 제외한 나머지 점들은 82° 각도로 회전하고 있다. edge exclusion은 3mm이다.

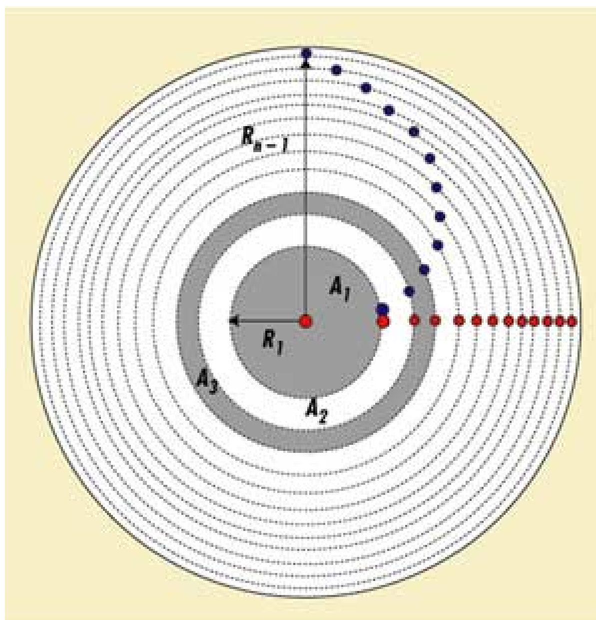

그림 3.
radial 측정형상(n=13)에 대한 설계 프로세스. 파란색 심볼은 x축위에 정렬된 붉은 색 심볼과 동일한 점이다. 회전각은 7.5°

표 1은 그림 8의 13개 점에 대해 Cartesian x, y 축 지점들을 나열한 것이다.
이 패턴에서 여기서 주목해야 할 것은 등거리 방위지점들이 텍스트의 회전각을 이용하지 않았다는 점이다. 한편 위에서 간단히 설명한 방식을 이용하여 연마속도 거동에 관한 radial/등거리방위(azimuthal) 편차를 웨이퍼 전면에 걸쳐 정확하게 포착하는 동시에 지역 평균 측정치를 구현하는 site map을 만들어 낼 수 있다.
2차원 데이터를 하나의 line에 통합시키고 반경함수인 점들을 고려하여 line scan도 생성할 수 있다. 이에 따라 등거리방위편차에 대한 추가 정보도 얻을 수 있다.

Measurement Pattern					
Profile Type	Area 6-mm EE	Radial 6-mm EE	Area 4-mm EE	Radial 4-mm EE	Radial 3-mm EE
Center fast	4.86	2.64	12.55	6.01	8.03
Center slow	6.48	6.73	10.29	7.75	8.00

표 I : n=13에서 radial map의 site의 예

실험방법 및 결과

Rodel의 피닉스 소재 Materials Integration Center에서 blanket film에 대한 측정실험을 수행하였다. 장비는 Peter Wolters사의 PM200 Gemini CMP 장비와 Speedfam-IPEC사의 IPEC472 을 이용하였다. 소모성 파트 및 프로세스 장치도 다수 이용하였는 데 여러가지 site selection 방식간의 수용능력비교를 위해 동일 웨이퍼상에 중복 측정을 수행했다.

산화막 연마시에는 Rodel의 colloidal silica slurry(Klebosol 1501/50)와 IC1000 perforated / K-groove 연마패드를 이용하였고, 텅스텐 연마시에는 Rodel의 slurry(MSW2000) 및 IC1000 K-groove 연마패드를 이용하였다. 구리 연마공정에는 abrasiveless 실험용 슬러리 및 IC1000 K-x,y groove 연마패드를 이용하였다. 산화막 측정은 Therma-Wave사의 OptiProbe 2600에서, 구리/텅스텐 측정은 Creative Design Engineering사의 CDE ResMap에서 하였다.

아래에 연마속도 결과치는 CMP 공정 전후 두께값의 차이를 보여 주고 있다. 연마속도 평균 및 표준편차로부터 산출한 연마속도 면내 균일성(uniformity performance)은 퍼센트로 표시한다. 가령 연마분포가 평균 2500Å/min이고, 표준편차가250 Å/min일 때 uniformity는 10%로 본다.

산화막 연마(Oxide Polishing)

200mm 웨이퍼에서 hard carrier와 passive carrier ring을 갖춘 산화막 CMP의 적정 polish profile은 웨이퍼 중심부의 비교적 평탄한 지역으로 가늠한다. 60 ~ 80mm 반경 사이에서는 국소적으로 최대치를 보이고 90mm 이상에서는 연마속도가 급격히 감소하며 웨이퍼 양단 3~4mm범위에서는 연마속도가 눈에 띄게 증가하기 때문이다.

이러한 유형의 연마거동은 기존의 site selection pattern으로는 포착하기가 어렵다. 왜냐하면 대부분 연마속도 편차가 생기는 지역이나, 이산 반경에 하중이 많이 가해짐으로써 측정편중이 나타나는 지역에서는 측정을 하지 않기 때문이다. 특히 문제가 악화되는 경우는 극미소의 EE가 적용되는 경우다. 왜냐하면 웨이퍼 양단 부근에서 심한 편차가 나타나기 쉽기 때문이다. 이러한 극단적인 현상을 그림 4에서 볼 수 있다.

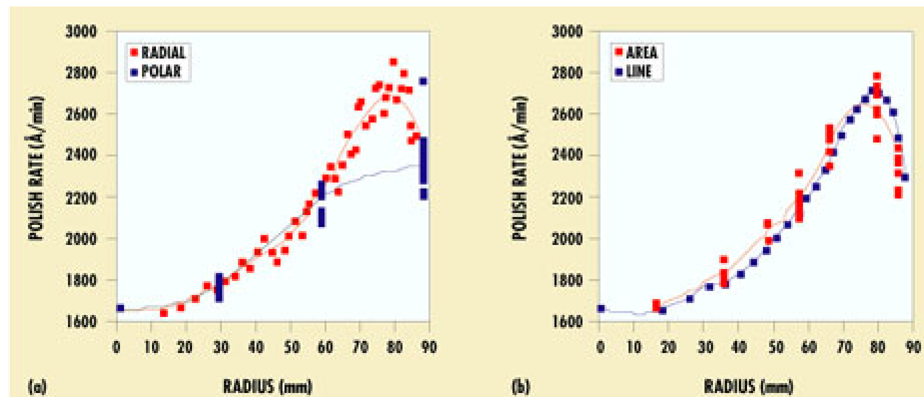

그림4. 4개 패턴을 이용하여 측정한 연마속도.
(a): 산화막 연마 싱글웨이퍼의 radial & polar
(b): area & line scan

그림 4에서는 각기 다른 4개 site selection 형상에 대한 반경함수로서 연마속도를 나타내고 있다. 3개 형상은 점이 49개인 것에 비해 area scan는 52개 이다.
여기에는 모두 3mm EE을 적용하였으며 데이터 수집을 위해 오목 분포도를 가지는 wafer carrier를 이용하였다. 이 결과 웨이퍼 중심부에 적용된 유효압력을 감소시킬 수 있었을 뿐만 아니라 웨이퍼 중심부의 연마속도를 slow하게 구현할 수 있었다.
이 그림은 2차원 데이터를 line위에 통합시킨 것이다(radial map, polar map, area map의 경우
λ =1000, line scan의 경우 λ =1).

3개의 이산 radial point와 중심점 및 7개 이산 radial point에서 각기 측정한 polar & area 형상은 line scan과 radial map에서보다 정보 제공량이 훨씬 적다.
radial coverage의 gap으로 인해 polar / area 방식은 연마거동에 관한 정보를 잘못 나타낼 가능성이 상당히 크다는 것이 단점으로 지적된다.

이와 반대로 그림 4의 연마분포는 최적화된 것은 아니나 site selection pattern에 의해 생긴 두께 정보의 차이를 보여 주는 데 확실히 도움이 된다. polar map은 실제 이 경우에 실제적인 거동 포착이 형편없었다. line scan은 실제 연마거동을 종합적으로 보여 주지만 지역평균측정치는 아니다(점들이 radial 기반으로 규칙적인 배열을 이루고 있으므로 웨이퍼 중심부의 수집정보는 웨이퍼 가장자리보다 가중치가 크다). line scan은 어떠한 등거리방위 정보도 제공하지 않는다.

그림 5는 site selection 방식 중 3개 형상의 상대적 편중효과를 좀 더 자세히 본 것이다. 이 그림에서는 반경 제곱의 함수로 주어진 반경에서의 점의 개수를 나타내고 있다. 여기서 반경의 제곱은 면적에 비례한다. 3가지 방식 모두 광역적 개념에서 지역평균측정치를 나타내고 있지만 측정밀도에서 심각한 국소 편차가 있음을 알 수 있다.

radial map의 경우 측정점들은 고른 분포를 보이고 있으며 점들도 약간의 국소적인 편차는 있지만 상당히 고른 분포를 보이고 있다. 그러나 polar map의 경우 측정치가 웨이퍼 양단쪽으로 가면서 심각한 편중현상을 보인다. 어느 정도냐 하면 두께 정보의 거의 절반이 최외곽 반경에서 수집되고 있는 실정이다. 이들 샘플이 보여주는 편차는 CMP 공정시 전형적으로 관찰되는 radial 연마속도 편차와 관련하여 종종 데이터를 오해를 초래한다.

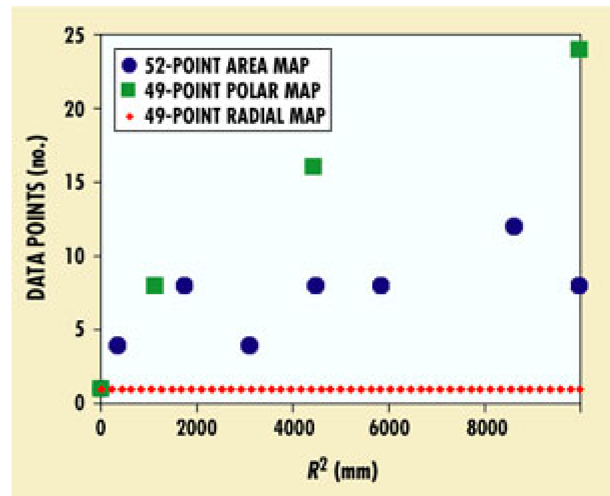

그림 5.
반경제곱의 함수로서 area, polar 및 radial pattern에 대한 측정점 밀도
(R^2는 웨이퍼 면적에 비례함)

보다 현실적인 프로세스 시나리오는 그림 6에 나타나 있다. 이 그림은 웨이퍼 backside 압력의 함수로서 연마속도와 면내균일성을 좌표로 보여 주고 있다.

backside 압력은 보통 CMP에서 uniformity를 제어하는 데 이용하고 있는데, 웨이퍼 양단에 대응하여 웨이퍼 중심부의 연마속도 증가요인으로 작용한다.

이 그림에 나와 있는 데이터는 앞에서 언급한 4개 site selection 형상을 이용하여 평탄한 분포를 갖는 wafer carrier를 이용하여 추출한 것이다. 각 데이터 군에서 wafer notch와 가장 가까이에 있는 외좌층(外座層)은 polar 데이터에서 배제되었다. 4개 형상 결과치에서 중요한 차이를 읽을 수 있다.

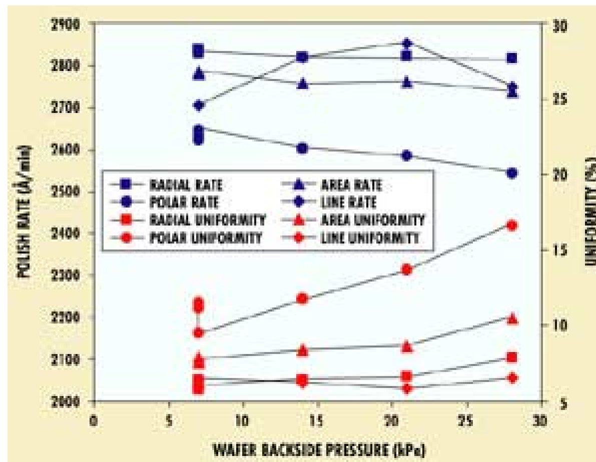

그림 6.
산화막 CMP웨이퍼에 대한 backside 압력의 함수로서의 연마속도와 uniformity 데이터.

특히 radial & polar maps의 차이점을 뚜렷하게 볼 수 있는 데 polar map데이터는 radial map 데이터와 비교할 때 연마속도가 7.3–9.9%, uniformity가 49–112% 과다측정되어 있다.

Copper / Tungsten Polishing

금속연마에서 웨이퍼 하중으로 인한 편중효과는 산화막 CMP의 경우보다 심각하지는 않다. 금속막 측정시 EE는 산화막 측정시 EE보다 일반적으로 크기 때문이다.

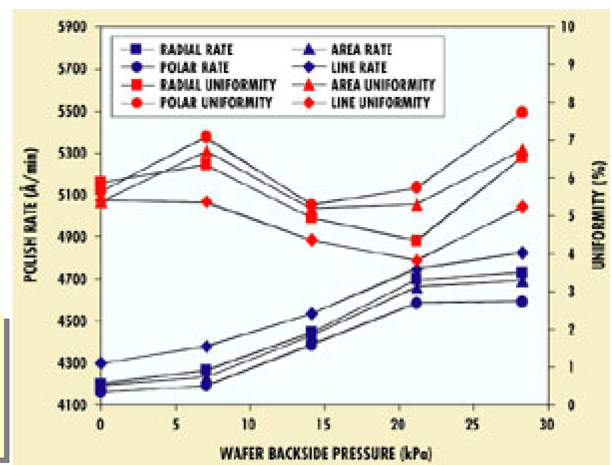

그림 7.
Cu CMP웨이퍼에 대한 backside 압력의 함수로서의 연마속도와 uniformity data.

그림7은 Cu CMP 공정에서 발생한 backside 압력의 함수로서 데이터를 보여주고 있는 데, polar map을 이용한 경우 연마속도가 무려 3% 과소측정되어 있고 uniformity는 무려 32%나 과다측정되어 있다.

이와 유사한 효과는 텅스텐 연마 웨이퍼에서 측정한 측정치에서도 관찰되었다. 금속 CMP 데이터는 형상간 이와 똑 같은 차이점이 나타나지 않았다. 이유는 2가지. 첫번째로는 최대 연마속도는 polar map의 측정 링 중 1개와 대략 일치했고, 두번째 이들 측정치의 EE은 10mm로 설정하였다. 그럼에도 불구하고 4개 형상에 대한 연마분포에서 몇 가지 차이점은 분명히 나타났다.

이 밖에 수율 요구사양의 향후 증가는 웨이퍼의 외곽 양단을 십분 이용할 것을 필요로 할 것이다. 금속증착공정에서 기술진보와 edge effects의 중요성은 점점 줄어들고 있기 때문에 산화막 CMP에서 분명한 잇슈들이 금속 CMP에서도 마찬가지로 발견될 것이다.

프로세스 최적화 사례연구

여기서 기술한 프로세스 최적화 연구의 목적은 엄격한 연마속도 및 uniformity의 일정요건에 대응할 수 있는 CMP 공정을 개발하는 것이었다. EE=6mm(가능하다면 4mm)를 이용하여 웨이퍼 면내 균일성의 최고 한계치를 유지하는 목적도 이에 포함되어 있었다. 웨이퍼 down force 및 backside pressure를 달리하면서 실험을 하였고 radial map(EE=3, 4, 6mm)와 area map(EE=4, 6mm)을 이용하여 동일 웨이퍼에서 중복측정을 수행하였다.

그림 7에서 제시한 데이터는 4mm, 6mm area mapping 데이터간 가장 극명한 차이를 나타낸 profile의 경우이다. 이 차이는 최외곽 점에서 가장 뚜렷이 나타났다. 대부분의 경우 96mm ring은 웨이퍼 전면에 걸쳐 연마속도 최소치를 나타낸다. 한편 반경이 96mm이상에서는 leading-edge effects가 지배적이며 연마속도가 상당폭 증가한다. 이 형상은 그림 8에서 설정한 아래쪽 데이터에서 볼 수 있다. 여기서 radial 형상을 이용한 연마속도는 96 mm에서보다 97 mm에서 더 크다.

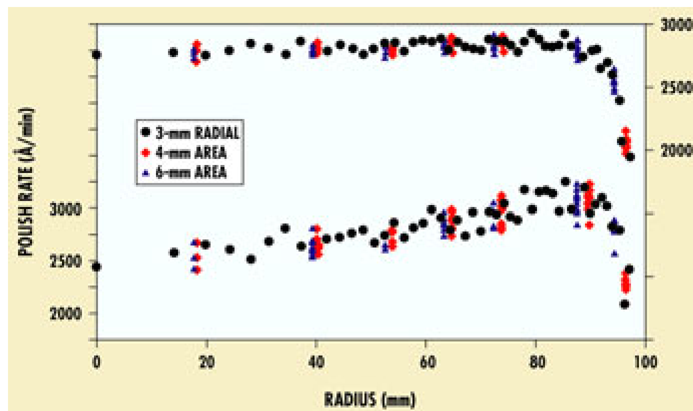

그림 8. 프로세스 최적화 실험에서 산화막 CMP 웨이퍼에 대한 반경의 함수로서 연마속도.

표 2는 그림 8의 2개 연마분포도에 대한 uniformity 데이터를 나타내고 있다. 또한 radial 형상과 4mm, 6mm EE를 이용하여 측정한 비교데이터도 함께 제시되어 있다.

n	3-mm EE		5-mm EE		10-mm EE	
	X축	Y축	x축	Y축	x축	Y축
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	-28.00	0.00	-27.42	0.00	-25.98
3	0.00	39.60	0.00	38.78	0.00	36.74
4	-48.50	0.00	-47.50	0.00	-45.00	0.00
5	56.00	0.00	54.85	0.00	51.96	0.00
6	44.27	-44.27	43.36	-43.36	41.08	-41.08
7	-48.50	48.50	-47.50	47.50	-45.00	45.00
8	52.39	52.39	51.31	51.31	48.61	48.61
9	-56.00	-56.00	-54.85	-54.85	-51.96	-51.96
10	0.00	-84.00	0.00	-82.27	0.00	-77.94
11	88.55	0.00	86.72	0.00	82.16	0.00
12	0.00	92.87	0.00	90.96	0.00	86.17
13	-97.00	0.00	-95.00	0.00	-90.00	0.00

표 2. 그림 8에서 나타난 Center fast/Center slow 연마분포에 대한 uniformity 통계

미소 EE이 심각한 edge effects를 갖는 웨이퍼에 적용될 경우 area map처럼 일반적으로 robust한 site selection pattern조차도 잘못된 프로세스 최적화 정보를 생성할 수 있다.

예를 들어 uniformity에 대한 반응표면좌표를 나타내는 그림 9에서 좌표 모두가 high down force / low backside pressure조건에서 uniformity가 최적화되어 있음을 나타내고 있다 하더라도 4mm radial / area response과 4mm / 6mm response사이에는 현저한 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 이 밖에 4mm area 좌표만이 low down force와 backside pressure조건에서 uniformity가 국소적으로 최소치를 보이고 있음을 알 수 있다.
down force와 backside pressure가 점점 작아지는 현상은 3개 좌표 모두에서 동일하다.
그러나 uniformity의 미세화는 그렇지 않다.

커스터머 웨이퍼에 최적화된 프로세스를 적용하였을 때 국소적 편중현상과 site placement effect로 인한 상당한 편차가 관찰되었다. 4mm area 패턴의 평균 연마속도는 4mm radial 패턴의 2712 Å/min에 비해 2612 Å/min로, 연마속도가 4% 가량 적게 측정되었다.

4mm area 패턴의 평균uniformity는 9.32%인 반면 4mm radial 패턴은 4.93%였다.
따라서 uniformity가 108%나 과다 측정되었다. 6mm radial / area 패턴의 평균연마속도는 각각 2730/ 2692 Å/min이었고 평균 uniformity는 각기 2.71 / 3.45%였다.

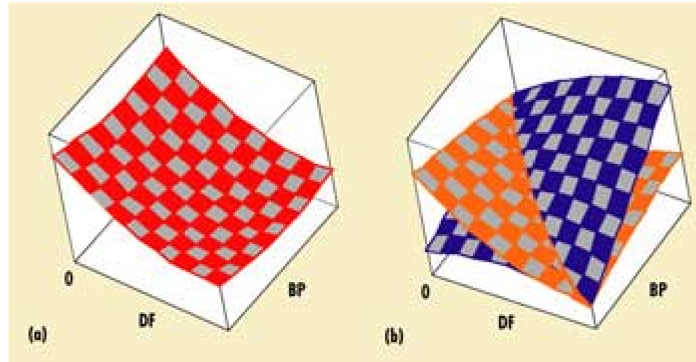

그림 9. 3가지 지역선택방식형상을 이용한 프로세스 최적화 실험으로부터 웨이퍼를 중복측정하여 웨이퍼모델 표준적합도를 나타낸 반응표면좌표.
(a) area map으로 EE=6mm, (b) area & radial map으로 EE=4mm. 표면은 연마속도 표준편차의 표준적합도를 나타내며 웨이퍼 down force (DF)와 backside pressure (BP)의 함수를 표시한 것이다.

결론

웨이퍼 두께측정을 위한 기존의 **site selection** 형상은 **CMP** 공정에서 일반적으로 관찰되는 복잡한 **radial** 연마속도 편차 포착을 목적으로 하지 않는다.
때문에 데이터의 심각한 편중현상은 이산 반경의 하중에 의해 생길 수 있다. 또한 대부분의 두께편차가 일어나는 지역과 맞지 않거나 이와 반대로 국소적인 극단적 두께편차를 갖는 지역을 과다 측정할 수도 있다. 여기서 제시하는 대안적인 **site selection** 방법인 **radial** 형상은 이러한 문제들을 충분히 극복할 수 있음을 증명했다.

이 형상은 지역적 평균치를 구현함으로써 **CMP**에 의한 웨이퍼의 라디알/등거리방위 두께편차를 정확하고 효과적으로 포착할 수 있다.

제공 : 세미파크(www.semipark.co.kr), 2002년 2월 21일
저자 : A. Scott Lawing, Process Development Engineer, Rodel