

산화막 CMP 의 연마균일도 향상을 위한 웨이퍼의 에지형상제어

Wafer Edge Profile Control for Improvement of Removal Uniformity in Oxide CMP

최성하¹, 정호빈¹, 박영봉¹, 이호준¹, 김형재², 정해도^{1,✉}

Sung Ha Choi¹, Ho Bin Jeong¹, Young Bong Park¹, Ho Jun Lee¹, Hyoung Jae Kim² and Hae Do Jeong^{1,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 (Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

² 한국생산기술연구원 (Dongnam Division, KITECH)

✉ Corresponding author: hdjeong@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2463

Manuscript received: 2011.8.3 / Revised: 2011.10.11 / Accepted: 2011.11.8

There are several indicators to represent characteristics of chemical mechanical planarization (CMP) such as material removal rate (MRR), surface quality and removal uniformity on a wafer surface. Especially, the removal uniformity on the wafer edge is one of the most important issues since it gives a significant impact on the yield of chip production on a wafer. Non-uniform removal rate at the wafer edge (edge effect) is mainly induced by a non-uniform pressure from non-uniform pad curvature during CMP process, resulting in edge exclusion which means the region that cannot be made to a chip. For this reason, authors tried to minimize the edge exclusion by using an edge profile control (EPC) ring. The EPC ring is equipped on the polishing head with the wafer to protect a wafer from the edge effect. Experimental results showed that the EPC ring could dramatically minimize the edge exclusion of the wafer. This study shows a possibility to improve the yield of chip production without special design changes of the CMP equipment.

Key Words: Chemical Mechanical Planarization (화학 기계적 평탄화 공정), Edge Effect (에지효과), Pad Rebounding (패드 반발), Edge Profile Control Ring (에지형상제어 링)

1. 서론

화학 기계적 평탄화 공정(chemical mechanical planarization, CMP)은 반도체 생산공정 중 웨이퍼의 광역 평탄화를 위한 필수적인 기술로서 연마패드와 웨이퍼 사이에 발생하는 기계적 작용과 슬러리와 웨이퍼 사이에 발생하는 화학적 작용을 통하여 웨이퍼의 표면을 연마하는 기술이다.¹ 이러한 화학 기계적 평탄화 공정의 질을 평가하는 인자 중에서 웨이퍼의 재료제거율과 표면의 결함 정도, 그리고 웨이퍼 에지 부근에서 급격한 연마율의 변화를 지칭하는 에지효과(edge effects)가 중요하게 고려되고 있다.² 이러한 특성들 중 에지효과는 소자의 생산이 불가능한 에지제외영역(edge exclusion)의 원인이

되어 생산성 저하 및 경제적 손실을 일으킨다.

Fu³ 등은 웨이퍼의 뒷면에 균일한 압력이 가해지더라도 웨이퍼와 패드 계면의 압력분포가 불균일하게 발생한다는 것을 수식으로 증명하였으며, 이러한 이유로 에지효과가 발생한다고 하였다. 그리고 Wang⁴ 등은 웨이퍼의 표면에 작용하는 Von-Mises 응력분포가 웨이퍼의 연마율 분포와 비례한다는 것을 증명하였다. 그리고 에지효과는 웨이퍼의 에지 부분에서 가공면과 접촉하는 패드의 표면이 불균일하게 변형되는 패드 프로파일의 영향으로 인한 웨이퍼 가공면의 불균일한 압력분포, 혹은 불균일한 Von-Mises 응력분포의 영향으로 인해 발생한다고 하였다. 일반적으로 에지효과가 발생하는 원인에는 웨이퍼의 뒤틀림, 슬러리의 분포

및 수송, 패드의 변형 등 많은 요소가 고려되었지만, 특히 불균일한 압력분포로 인한 패드의 변형에 의한 효과가 지배적임을 위 연구들로부터 알 수 있었다.

국제 반도체 기술지도(International Technology Roadmap for Semiconductor, ITRS)는 생산율의 향상을 위해 웨이퍼의 에지제외영역을 Fig. 1과 같이 에지로부터 2 mm까지 축소시키는 것을 목표로 하였으며 이 조건을 충족시키기 위한 많은 연구가 진행되었다.

Lo⁵등은 2차원 축대칭 유한요소해석을 통하여 웨이퍼와 리테이닝 링(retaining ring)의 압력 및 간격의 최적화를 통하여 웨이퍼 에지의 연마균일도를 제어할 수 있다는 결론을 내렸으며, Chen⁶등은 다중압력전사 연마헤드(multi zone polishing head)를 사용하여 웨이퍼 에지 주변의 패드 거동을 제어함으로써 웨이퍼 에지에 가해지는 압력을 균일하게 할 수 있다고 제안하였다. 그리고 Enomoto⁷ 등은 가늘고 얇은 섬유와 단단한 폴리머 재질을 적층시킨 연마패드를 사용함으로써 슬러리 입자의 참여를 높이는 동시에 웨이퍼 에지에 발생하는 에지효과를 줄일 수 있다고 하였다.

하지만 리테이닝 링의 조건을 바꾸는 방법은 실제로 리테이닝 링과 웨이퍼의 간격을 늘릴 수 없는 제약이 있으며, 또한 간격이 커질수록 공정 중 웨이퍼의 이탈 및 다른 변수가 발생할 위험이 따르며 가늘고 얇은 섬유층과 단단한 폴리머 층으로 이루어진 새로운 연마패드를 사용하는 방식은 연마패드의 선택에 매우 제한적이라는 단점이 있다. 그리고 multiple zone system은 패드의 거동에 따라 압력을 조절함으로써 웨이퍼의 에지효과를 줄이기에 탁월하지만, 연구 및 생산 공정에서 사용되고 있는 기존의 연마장비에 적용할 수 없으므로 새로운 장비를 도입시켜야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 웨이퍼 에지영역에 해당하는 영역에 에지형상제어 링(edge profile control Ring, ECP ring)을 사용하여 기존의 연마 장비에서 단지 연마헤드의 크기만 키움으로써 패드의 불균일한 거동으로부터 발생하는 웨이퍼의 에지효과를 최소화할 수 있게 하였다. EPC 링은 리테이닝 링의 재질로 사용되는 에폭시 소재의 박판을 밀링공정을 통해 ±0.1mm의 공차로 정교하게 만들었으며 EPC 링의 뒷면에 얇고 균일한 접착테이프를 통해 멤브레인(membrane)에 부착되어 사용된다.

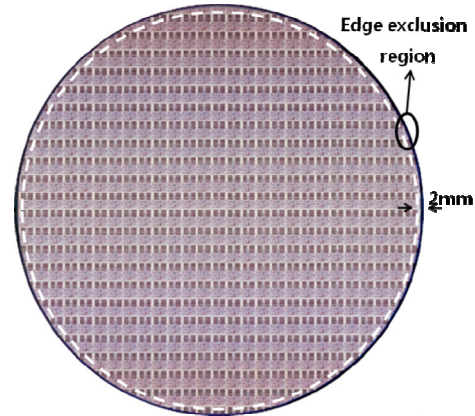


Fig. 1 Illustration of the edge exclusion on the wafer

2. 실험장치 및 절차

화학 기계적 평탄화 기술은 Fig. 2와 같은 연마기구를 가진다. 여기에서 슬러리는 웨이퍼와의 화학적인 반응을, 연마패드는 웨이퍼와의 접촉에 의한 기계적 작용을 하게 되며 이 두 가지 반응이 융합되어 웨이퍼 표면을 평탄하게 제거한다.

이러한 재료제거기구 중 연마패드가 웨이퍼 내 연마불균일도(within wafer non uniformity, WIWNU)에 지배적인 영향을 미치는 요소로 작용한다.⁸ 특히 패드의 영향은 웨이퍼의 에지 부분에서 집중되며 에지제외영역의 가장 큰 원인으로 고려되고 있다.⁹

본 논문에서는 패드의 영향을 컨트롤 하기 위하여 EPC 링을 개발하였으며, EPC 링의 폭, 웨이퍼와의 간격 및 두께를 변수로 설정하여 실험을 진행하였다. 연구에 적용된 실험절차는 먼저 리테이닝 링의 압력을 변동시켜 연마한 결과를 통하여 패드가 영향을 미치는 범위를 확인한 후 EPC링의 폭을 설정하였다. 그 후 각각의 변수에 따른 EPC 링을 장착한 산화막 웨이퍼를 1분간 연마하였으며, 박막 두께 측정기를 사용하여 연마된 산화막의 두께를 측정하였다. 연마실험의 재현성에 대한 신뢰도를 평가하기 위해 먼저 3장의 더미(dummy) 웨이퍼와 EPC 링으로 연마를 하여 패드 표면 및 EPC 링 표면을 안정화시킨 뒤, 3장의 모니터링(monitoring) 웨이퍼로 실험을 수행하였다. 웨이퍼와 EPC 링의 간격은 0 mm, 1 mm, 2 mm로 설정하였으며, EPC 링의 두께는 500 μm, 600 μm, 650 μm, 700 μm, 750 μm, 그리고 800 μm 로 설정하였다. 각각의 실험에서 압력과 슬러리의 유량, 속도 등을 포함한 모든 조건을 동일하게 하였으며 자세한 공정 조건

은 Table 1에 나타내었다.

EPC 링을 장착하기 위해서 기존의 웨이퍼 크기보다 더 큰 연마헤드를 사용하여 실험을 진행하였으며 EPC 링의 장착 전/후 상태의 이해를 위해 Fig. 3에 도식화하였다.

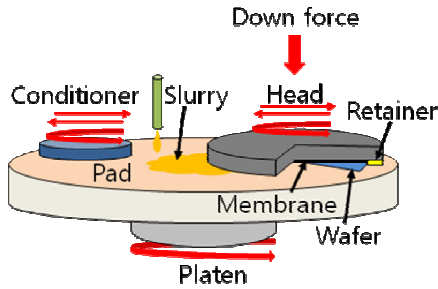


Fig. 2 Apparatus of conventional CMP equipment

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Conditions
polisher	poil-500 (G&P Tech, Inc.)
wafer	oxide wafer (diameter 100mm / 4cm × 4cm coupon)
pad	stacked pad (Nitta-Hass, Inc.)
slurry	ILD 3225 (Nitta-Hass, Inc.)
flow rate	150ml/min
velocity	head: 80rpm / platen: 80rpm
pressure	wafer: 300g/cm ² retaining ring: 400g/cm ²

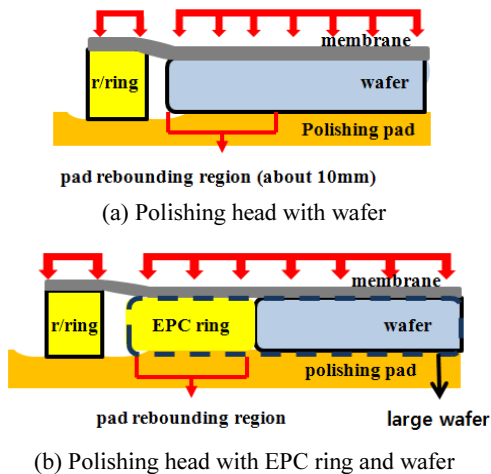


Fig. 3 Cross sectional illustration of polishing head

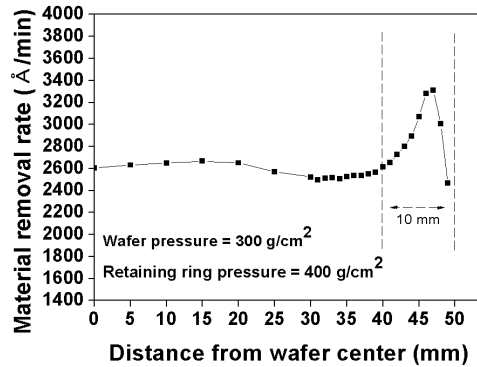


Fig. 4 Change of removal profile according to pressure of retaining ring

3. 결과 및 고찰

3.1 EPC 링의 폭 실험 결과

Fig. 4는 최적화된 공정조건으로부터 얻은 직경 100 mm 산화막 웨이퍼의 재료제거율 그래프이다. 실험결과, 웨이퍼의 중심을 기준으로 약 -40 mm에서 40 mm의 범위에서 균일한 연마프로파일을 보였지만 에지에서 10 mm의 범위에서는 연마프로파일 차이가 뚜렷하게 나타났다. 동일한 실험방법으로 직경 200 mm 웨이퍼를 연마한 선행연구에 따르면, 최적화된 공정조건임에도 불구하고 에지에서 불균일한 연마프로파일이 발견되었으며, 그 영역은 직경 100 mm 웨이퍼와 동일하게 10 mm의 범위에서 나타났다.¹⁰

여기서 발생한 에지의 불균일한 연마프로파일은 리테이닝 링이 패드거동에 영향을 미쳤기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 그리고 웨이퍼의 크기에 상관없이 에지로부터 10 mm 영역에 걸쳐 발생한다는 결론을 내렸다. 위 결과를 통해 기존의 직경 150 mm 웨이퍼에 사용되던 연마헤드에 100 mm 웨이퍼와 폭 25 mm의 EPC 링을 장착 할 경우, 리테이닝 링과 패드로부터 발생하는 에지효과를 충분히 피할 수 있음을 예상할 수 있다.

3.2 EPC 링의 간격 실험 결과

웨이퍼와 EPC 링의 간격에 따른 100 mm 웨이퍼의 연마프로파일을 Fig. 5에 나타내었다. EPC 링의 두께는 웨이퍼와 같고, 간격만을 변수로 설정하여 실험하였다. EPC 링을 장착한 웨이퍼의 연마프로파일과 기존의 연마방식을 사용한 기준 웨이퍼(reference wafer)의 연마프로파일을 비교한 결과

EPC 링을 사용한 웨이퍼의 연마프로파일이 매우 균일하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 기존 연마과정에서 발생되었던 패드거동에 관한 문제점을 ECP 링을 사용함으로써 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 EPC 링과 웨이퍼의 간격에 따른 연마불균일도를 나타낸 그래프로 기존 웨이퍼는 에지제외영역이 4 mm(EE4)이상되는 것을 알 수 있었다. EPC 링을 장착하여 웨이퍼와의 간격이 0 mm인 경우는 에지제외영역이 웨이퍼의 에지로부터 2 mm(EE2)일 때 연마불균일도가 2% 내외로 개선되었으며, EPC 링의 간격이 1 mm, 2 mm인 경우 에지제외영역이 동일하게 3 mm(EE3)일 때 연마불균일도가 2% 내외로 개선된 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 EPC 링과 웨이퍼 사이의 1 mm 이상의 간격은 웨이퍼의 에지제외영역에 영향을 미치는 변수로 작용함을 알 수 있었으며, 이는 EPC 링과 웨이퍼의 간격이 패드와 웨이퍼 사이에 불균일한 접촉점을 유발하여 웨이퍼의 에지에 영향을 미친 것으로 판단하였다. 그리고 1 mm 와 2 mm의 결과는 매우 유사한 결과가 나왔다. 이를 통해 1 mm의 간격차이는 웨이퍼의 에지로부터 3 mm 이전까지의 범위에만 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3.3 EPC 링의 두께 실험 결과

Fig. 7은 EPC 링의 두께 변수에 따른 웨이퍼의 재료제거율을 측정한 그래프이다. 두께 변수에 따른 실험은 4 cm×4 cm 크기의 쿠폰웨이퍼를 사용하여 진행하였다. 실험결과, EPC 링이 웨이퍼보다 얇은 경우 웨이퍼 중심의 재료제거율보다 에지의

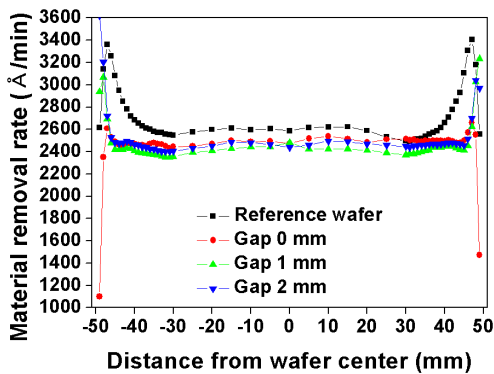


Fig. 5 Removal profile according to gap on each wafer

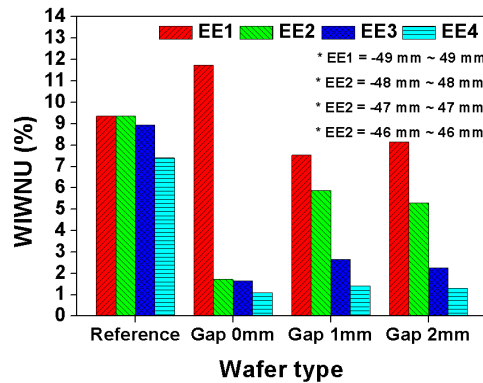


Fig. 6 WIWNU according to gap on each wafer

재료제거율이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 EPC 링이 웨이퍼보다 두꺼운 경우의 재료제거율은 웨이퍼의 에지보다 중심이 높게 나오는 경향을 보였다. 이는 웨이퍼가 EPC 링보다 두꺼운 경우, 웨이퍼의 에지에서 멤브레인의 간섭이 발생하여 압력이 집중되는 현상과(Fig. 9(a)), EPC 링이 웨이퍼보다 두꺼운 경우 웨이퍼의 에지에 멤브레인을 통한 압력전달이 원활하게 이루어지지 않아 발생하는 현상으로 판단하였다(Fig. 9(b)).

Fig. 8은 EPC 링의 두께에 따른 연마불균일도를 나타낸 것이다. 웨이퍼와 같은 두께의 700 μm EPC 링은 에지제외영역이 1 mm일 때부터 연마불균일도가 2%이하의 값을 보임을 알 수 있었다. 그리고 EPC 링과 웨이퍼의 두께차이가 50 μm 인 경우 즉, EPC 링의 두께가 650, 750 μm인 경우에는 에지제외영역이 2 mm일 때부터 연마불균일도가 2%이하의 값을 보이는 것을 알 수 있었다. 하지만 웨이퍼와 EPC 링의 두께차이가 100 μm이상 차이가 날 경우 에지제외영역이 3 mm가 되어야 연마불균일도가 2%이하의 값을 보임을 알 수 있었다. 위 실험을 통해 산화막 웨이퍼 연마공정에서 ITRS에 부합하는 기준 즉, 에지제외영역이 2 mm이내의 기준을 만족시키기 위해선, EPC 링을 웨이퍼보다 50 μm 더 두껍게 설계하여야 하며 EPC 링의 수명을 웨이퍼보다 50 μm 만큼 짧아질 때까지 사용하도록 공정조건을 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Fig. 10은 웨이퍼의 연마프로파일과 EPC 링 두께에 대한 상관관계를 나타낸 그래프이다. EPC 링의 두께가 웨이퍼와 같아질수록 웨이퍼 에지의 재료제거율은 점점 균일해질 것으로 생각된다.

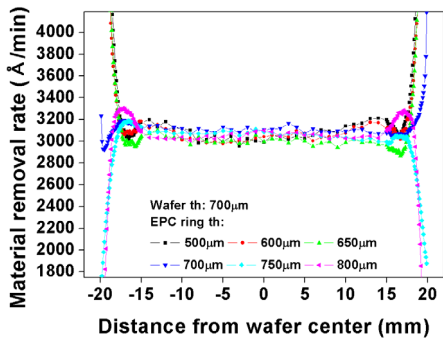


Fig. 7 Removal profile according to EPC ring thickness on each wafer

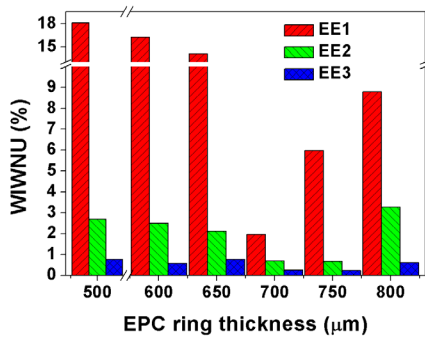


Fig. 8 WIWNU according to thickness of the EPC ring on each wafer

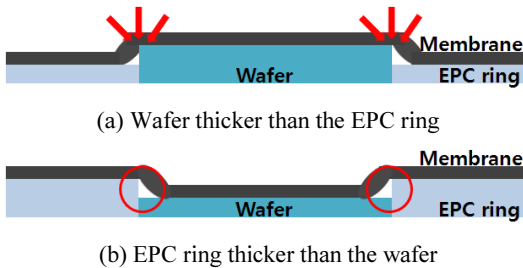


Fig. 9 Cross sectional illustration of wafer and EPC ring

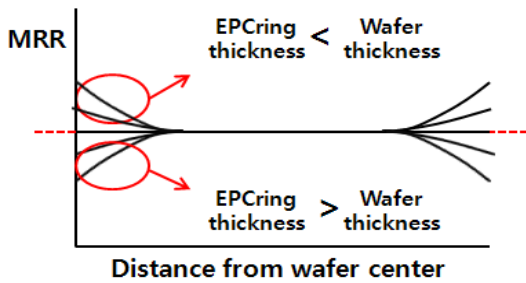


Fig. 10 Removal profile according to EPC ring thickness

모든 실험결과로부터 EPC 링의 폭은 10 mm 이상, 웨이퍼와 EPC 링 사이의 간격은 0 mm, 그리고 웨이퍼와 EPC 링의 두께 차이는 $\pm 50 \mu\text{m}$ 인 EPC 링이 최적화된 디자인이라고 판단하였다. 최적화된 EPC 링의 조건에 해당하는 EPC 링의 사용을 통해 에지제외영역을 2 mm까지 줄일 수 있다는 결론을 내렸으며, 이는 국제 반도체 기술지도의 기준에 부합하는 결과로 이어진다.

공정 중 EPC 링의 마모량은 300분의 연마시간 동안 $100 \mu\text{m}$ 정도로 나타났다. 즉 EPC 링의 수명 동안 산화막 웨이퍼를 기준으로 300장 정도의 웨이퍼를 연마할 수 있으므로, EPC 링의 사용을 통해 경제성의 장점을 충분히 가질 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 반도체 제조 공정에서 화학 기계적 평탄화 공정 중 발생하는 반도체 소자의 생산성 저하의 원인이 되는 에지제외영역의 발생을 확인하였고, EPC 링을 사용하여 이를 개선하기 위한 연구를 진행하였다. 최적의 EPC 링 설계를 위해 링의 폭, 웨이퍼와의 간격, 그리고 링의 두께를 변수로 설정하였고 실험을 진행하였다.

1) 리테이닝 링의 압력을 바꿔가며 웨이퍼를 연마함으로써 패드의 거동이 에지제외영역에 영향을 미치며, 그 범위가 10 mm에 이르는 것을 확인하였고, EPC 링의 폭은 10 mm 이상으로 제작되어야 함을 알 수 있었다.

2) EPC 링과 웨이퍼 사이의 간격 변수를 0 mm, 1 mm, 2 mm로 설정하여 실험한 결과 EPC 링과 웨이퍼 사이의 간격이 에지제외영역에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 간격이 0 mm인 경우 에지제외영역이 2 mm에 불과하였지만, 간격이 있을 경우 에지제외영역이 3 mm로서, 1 mm의 활용 가능한 웨이퍼의 면적손실이 발생하는 것을 확인하였다.

3) EPC 링과 웨이퍼의 두께 차이가 미치는 영향을 분석한 결과, EPC 링이 웨이퍼보다 두꺼울 경우 웨이퍼 에지의 재료제거율이 감소하였다. 그러나 EPC 링이 웨이퍼보다 얇은 경우 웨이퍼 에지의 재료제거율이 증가하는 경향을 보였다. 이는 두께 차이로 인해 멤브레인이 웨이퍼의 에지에 균일한 압력을 전달하지 못하기 때문에 발생하는 것으로 판단되며, 이를 통해 EPC 링의 두께와 웨이퍼의 두께 차이가 줄어들수록 웨이퍼 에지의 연마

균일도가 좋아질 수 있다는 결론을 내렸다.

최적화된 EPC 링의 사용을 통해 웨이퍼의 에지제외영역을 10 mm에서 2 mm이하로 줄일 수 있었으며, 이는 EPC 링을 사용함으로써 장비의 교체 없이 간단한 공정변화만으로 이루어낸 결과이다.

화학 기계적 평탄화 공정에서 웨이퍼의 재료제거와 함께 EPC 링의 마모현상도 일어나기 때문에 EPC 링의 두께 변수는 무엇보다도 중요하게 여겨져야 할 것이다. 실제 공정에서 웨이퍼 연마 시 균일한 연마프로파일을 얻기 위한 소모재로써 EPC 링을 사용 할 경우 공정조건에 따라 EPC 링의 두께에 대한 신뢰값을 구하여야 할 것으로 생각되며 이에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Bae, J. H., Lee, S. J., Park, J. H., Nishizawa, H., Kinoshita, M. and Jeong, H. D., "Effect of Pad Thickness on Removal Rate and Within Wafer Non-Uniformity in Oxide CMP," J. of the KIEEME, Vol. 23, No. 5, pp. 358-363, 2010.
2. Eamkajornsiri, S., Narayanaswami, R. and Chandra, A., "Yield Improvement in Wafer Planarization: Modeling and Simulation," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 22, No. 3, pp. 239-247, 2002.
3. Wang, D., Lee, J., Holland, K., Bibby, T., Beaudoin, S. and Cale, T., "Von Mises Stress in Chemical-Mechanical Polishing Process," J. Electrochem. Soc., Vol. 144, No. 3, pp. 1121-1127, 1997.
4. Fu, G. and Chandra, A., "The relationship between wafer surface pressure and wafer backside loading in Chemical Mechanical Polishing," Thin Solid Films, Vol. 474, No. 1-2, pp. 217-221, 2005.
5. Lo, S. P., Lin, Y. Y. and Huang, J. C., "Analysis of retaining ring using finite element simulation in chemical mechanical polishing process," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 34, No. 5-6, pp. 547-555, 2007.
6. Chen, K. S., Yeh, H. M., Yan, J. L. and Chen, Y. T., "Finite-element analysis on wafer-level CMP contact stress: reinvestigated issues and the effects of selected process parameters," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 42, No. 11-12, pp. 1118-1130, 2009.
7. Enomoto, E., Satake, U., Miyake, T. and Tabata, N., "A newly developed polishing pad for achieving high surface flatness without edge roll off," Manufacturing Technology, Vol. 60, No. 1, pp. 371-374, 2011.
8. Kim, H. J., Kim, H. Y. and Jeong, H. D., "Study on Pad Properties as Polishing Result Affecting Factors in Chemical Mechanical Polishing," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 3, pp. 184-191, 2000.
9. Lin, Y. Y., Chen, D. Y. and Ma, C., "Simulation of a stress and contact model in a chemical mechanical polishing process," Thin Solid Films, Vol. 517, No. 21, pp. 6027-6033, 2009.
10. Bae, J. H., Lee, H. S., Lee, S. J., Guo, Y. C., Park, J. H., Kinoshita, M. and Jeong, H. D., "Effect of Retainer Pressure on Removal Profile and Stress Distribution in Oxide CMP," International Conference on Planarization/CMP Technology, pp. 345-349, 2009.