

화학기계적연마 공정의 유체역학적 압력 및 전단응력 분포 해석

조철호*, 박상신**, 안유민***

Hydrodynamic Pressure and Shear Stress in Chemical Mechanical Polishing

Chul-Ho Cho*, Sang-Shin Park**, and Yoomin Ahn***

ABSTRACT

Chemical Mechanical Polishing (CMP) refers to a material removal process done by rubbing a work piece against a polishing pad under load in the presence of chemically active and abrasive containing slurry. CMP process is a combination of chemical dissolution and mechanical action. The mechanical action of CMP involves hydrodynamic behavior. The liquid slurry is trapped between the work piece and pad forming a hydrodynamic film. For the first step to understand material removal mechanism of the CMP process, the hydrodynamic analysis is done with semiconductor wafer. Three-dimensional Reynolds equation is applied to get pressure distribution of the slurry film. Shear stress distributions on the wafer surface are also analyzed

Key Words : Chemical Mechanical Polishing(화학기계적연마), Hydrodynamic analysis(유체유동해석), Semiconductor wafer(반도체 웨이퍼), Slurry pressure(연마액 압력), Wafer shear stress(웨이퍼 전단응력)

1. 서론

최근에 반도체 산업이 급속히 발전함에 따라 반도체 집적화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 반도체의 집적화는 단위 면적 당 정보처리 혹은 저장 용량의 대형화로서, 회로 선폭의 최소화 와 웨이퍼의 대(大) 직경화와 다층 배선화가 필요하다. 대 직경의 웨이퍼 위에 배선을 다층 구조로 하기 위해서는 각 층마다의 평탄화가 요구되어진다. 배선층 평탄화 가공법으로서 화학기계적 연마 가공이 가장 유용하게 사용되고 있다⁽¹⁾. 미국이나 일본 등 선진국의 경우 반도체용 웨이퍼의 평탄화 및 경면 가공용 화학기계적연마 가공 시스템이 다양하게 개발되어 사용되고 있다. 국내에서

의 연구는 현재 초기 단계이지만 화학기계적연마 가공 시스템에 관한 관심이 증대되고 있다⁽¹⁻³⁾.

화학기계적연마 가공의 일반적인 구조는 Fig. 1 과 같다. 웨이퍼를 고정시키는 기구부와 연마패드를 올려놓는 정반과 연마액 공급장치 등으로 구성되어 있다. 화학기계적연마 가공의 기본 원리는 가공물을 일정한 가공하중으로 연마패드에 누르면서 서로 상대 운동을 시킨다. 화학적 반응 수용액 과 연마 입자들이 섞인 연마액은 가공물인 웨이퍼 와 연마패드 사이에 스며들게 된다. 화학적 용액에 의한 부식 작용과 연마입자에 의한 기계적인 제거 작용에 의해 가공면의 요철부위가 평탄하게 제거가 된다.

화학기계적연마의 가공성능으로서는 웨이퍼

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
** 영남대학교 기계공학부
*** 한양대학교 기계공학과

면 전체의 평탄화와 배선층 막 두께의 균일화가 중요하다. 이와 같은 가공성능을 해석하기 위해서는 가공 변수들과 가공면 제거율과의 상관관계를 밝혀내고, 이를 예측하는 것이 필요하다. 웨이퍼와 연마패드의 회전속도와 가공하중 등의 가공변수 변화에 따라 웨이퍼와 연마패드는 직접 접촉되기도 하고 연마액에 의해 틈새가 생겨 간접 접촉되는 현상이 일어난다고 여겨지고 있다⁽⁴⁾.

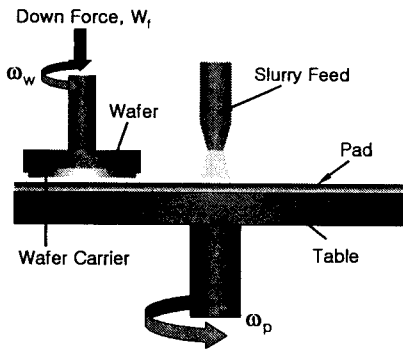


Fig. 1 Schematic of wafer CMP Equipment

가공면 제거율을 예측하기 위해서, Wang⁽⁵⁾등은 웨이퍼와 연마패드가 직접 접촉하는 경우에 대해서 접촉면의 응력분포를 2차원적으로 유한 요소법으로 계산하였다. 그리고 가공면 제거율이 Von Mises 항복응력에 비례한다는 가정하에 가공율을 고찰하였다. Srinivasa-Murthy⁽⁶⁾ 등은 같은 방법의 해석을 3차원적으로 확장하여 가공율을 고찰하였다. 연마패드와 웨이퍼 사이의 틈새에 연마액의 유막이 형성되는 간접 접촉 경우에 대해서, Runnels과 Eyman⁽⁷⁾은 화학기계적연마 공정을 2차원 유효역학적으로 간단히 모델링하여 웨이퍼 전면의 연마액 유막 압력과 유막 두께 등이 가공변수에 따라 어떻게 변화되는가를 해석하였다. Runnels⁽⁸⁾은 2차원 유효역학 해석을 웨이퍼 미소영역의 요철 부분에 적용하여 연마액 유동에 의한 전단응력이 가공면 제거율을 지배한다는 가정하에 가공율을 고찰하였다. 그밖에, 직접접촉과 간접접촉이 혼합적으로 발생하는 혼합접촉 경우에 대해서도 가공면 제거율 해석이 수행되고 있다^(4,9).

이 연구에서는 웨이퍼와 연마패드는 원판의 강체이며 표면은 매끄러운 면이라고 가정하고, 그 사이의 연마액으로 인해 완전 유체 유효성이 이루어지며 이로 인해 웨이퍼와 연마패드는 연마액에 의

해 완전히 분리된다는 가정하고자 한다. 이러한 간접 접촉 경우에 웨이퍼의 화학기계적연마가공 공정 중에 웨이퍼 전면에 형성되는 연마액의 압력 분포와 웨이퍼 면에 작용하는 전단 응력들의 분포를 3차원 유효역학적으로 해석하여 보고자 한다. 그리고 해석 결과에 의해 실제 가공에서 일어날 수 있는 현상들을 고찰하여 보고자 한다.

2. 유효역학적 해석

연마패드와 웨이퍼 사이의 연마액 유막의 압력 분포를 구하기 위해서 Navier-Stoke's 방정식으로부터 비압축성 유체에 관한 레이놀즈 방정식을 유도하여야 한다. 기준 좌표계는 원통 좌표계로 하고 Fig. 2에서 처럼 웨이퍼의 회전축을 기준으로 하여 연마패드의 임의의 점에서의 속도를 구한다.

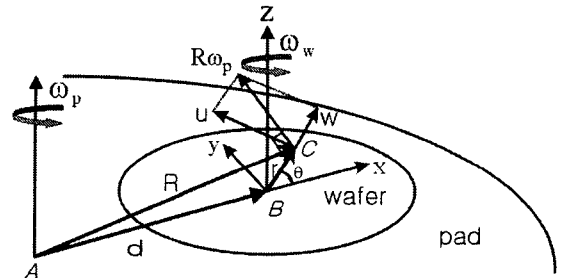


Fig. 2 Schematic of wafer CMP system

연마패드의 회전축으로부터 R만큼 떨어진 연마패드 위의 임의의 점을 c라 하면, u와 w는 그 점에서의 웨이퍼의 원주방향(θ)과 반경방향(r) 속도 성분이고 d는 패드와 웨이퍼 간의 축간거리, ω_w 와 ω_p 는 각각 웨이퍼와 패드의 회전속도를 나타낸다. 연마패드 c점의 속도 u, v를 웨이퍼 회전축에 대한 표현식으로 변환시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= (r + d \cos\theta) \cdot \omega_p \\ w &= d \sin\theta \cdot \omega_p \end{aligned} \quad (1)$$

극좌표계의 Navire-Stoke's 방정식에 식(1) 등의 경계 조건들을 대입하고 속도 분포를 구한 후, 연속 방정식에 대입하여 비압축성 유체라는 가정하에 적분을 수행하면 식(2)와 같은 극좌표계에서의 일반화된 레이놀즈 방정식이 유도된다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 6\mu d \sin\theta \cdot \omega_p \frac{\partial (r h)}{\partial r} \quad (2)$$

$$+ 6\mu \left\{ (r+d \cos\theta) \cdot \omega_p - r\omega_w \right\} \frac{\partial h}{\partial \theta}$$

식(2)에서 h 는 유막의 두께이며 p 는 유막의 압력이고 μ 는 유막의 점도이다.

수치해석에서 수렴성을 좋게 하기 위해 식(2)을 무차원화 한다. 그 결과를 극좌표계에서의 벡터 식으로 표현한 후에 가우스 다이버전스 정리를 적용하고 수식을 이산화하면 웨이퍼 면에 걸리는 압력분포를 수치해법으로 구할 수 있게 된다⁽¹¹⁾.

가공중에는 웨이퍼와 연마패드 사이의 상대운동으로 인한 연마액의 썩기 효과에 의해 유막에 뜰압력이 발생된다. 썩기 효과가 형성되기 위해서는 웨이퍼가 약간 기울어져야 한다. 즉, Fig. 3에서와 같이 피벗 축 Z_{piv} 를 중심으로 x 와 y 축 방향으로의 각각 α, β 각 만큼의 기울기를 가져야 한다. 이와 같은 썩기 효과에 의해 형성되는 연마액 유막 압력의 총합이 웨이퍼를 누르는 가공력과 똑같게 되면 웨이퍼와 연마패드는 연마액 유막에 의해 분리되어 간접 접촉하게 된다. 그리고 압력 분포에 의해서 피벗 축에 대한 α 와 β 방향으로의 회전 모멘트가 발생되는데, 모멘트의 합이 영이 되는 상태로 기울기가 형성된다. 이렇게 형성된 기울기가 계속 유지가 되면서 가공공정은 정상상태가 된다.

피벗 점에서의 유막 두께를 기준 틈새값(h_{piv})으로 정의하면, 웨이퍼 면 임의의 지점에서의 유막 두께를 두 자세각(α, β)과 기준 틈새 값의 함수로 표현할 수가 있다. 그 결과, 무차원화 된 유희틈새 함수 $\bar{h} (=h/h_{piv})$ 는 식(3)과 같이 정의될 수 있다.

$$\bar{h} = 1 - \frac{r_0}{h_{piv}} \bar{r} \sin\alpha \cdot \cos\theta - \frac{r_0}{h_{piv}} \bar{r} \sin\beta \cdot \sin\theta \quad (3)$$

식(3)에서 r_0 는 웨이퍼의 반경이고 $\bar{r} (=r/r_0)$ 는 반경 방향 무차원 변수이다.

연마패드 및 웨이퍼의 회전속도와 가공하중 등의 임의의 가공변수에 대해서, 앞서 설명한 방법으로 무차원화 이산화 된 식(2)에 식(3)의 \bar{h} 을 대입하고 얻은 식을 수치적으로 계산해 유막 압력 분포를 구하게 된다. \bar{h} 가 대입된 레이놀즈 이산화식에는 하나의 기준 틈새 값과 두 자세각 등 세 개의 미지수가 있게 된다. 세 미지수들을 풀기 위

해 유막 압력들에 의한 총합력(W)이 가공하중(W_f)과 같고, 자세각 방향으로의 두 회전 모멘트들(M_x, M_y)이 각각 영이 되어야 한다는 식(4)와 같은 세 가지 평형 조건들을 이용한다.

$$F(h_{piv}, \alpha, \beta) = W_f - W \quad (4)$$

$$M_x(h_{piv}, \alpha, \beta) = 0$$

$$M_y(h_{piv}, \alpha, \beta) = 0$$

입력변수를 $N'=(h_{piv}, \alpha, \beta)$ 라 놓고 이에 따른 목적함수를 $f(N')=[F(N'), M_x(N'), M_y(N')]$ 라 놓으면 식(5)와 같은 비선형 방정식을 얻게 된다.

$$f(N')=0 \quad (5)$$

f 는 독립변수, h_{piv}, α, β 에 대해 연속적이며 각각의 편미분을 갖는다고 가정하고, 식(6)과 같은 다차원 뉴턴 랩슨 방법을 이용하여 해를 구하게 된다⁽¹²⁾.

$$N^{(n)} = N^{(n-1)} - J^{-1}(N^{(n-1)})f(N^{(n-1)}) \quad (6)$$

식(6)에서 J 는 f 의 성분 h_{piv}, α, β 에 대한 Jacobian 행렬이다.

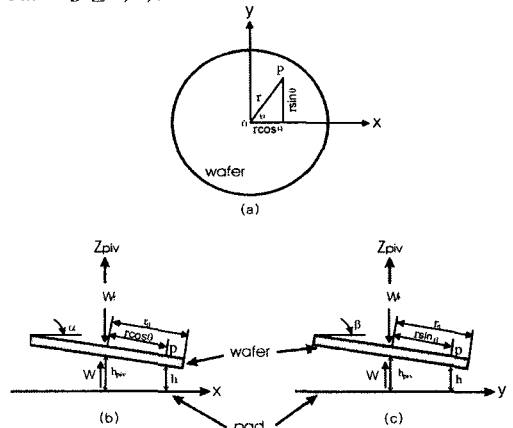


Fig. 3 Geometry of wafer state during CMP

3. 해석 결과 및 고찰

해석을 수행하기 위해 가정한 웨이퍼의 직경은 100mm이고 연마패드의 직경은 600mm이다. 웨이퍼와 연마패드와의 중심점의 거리는 150mm이다. 그 밖에 가정한 가공 변수들의 표준 조건들로서는 가공하중이 45kPa이고 연마액 점도(μ)가 0.004Pas 이고 웨이퍼와 연마패드의 회전속도(ω)는 모두 60rpm이다. 웨이퍼와 연마패드의 회전속도가 동일한 경우에 대해서만 해석하였는데, 웨이퍼와 연마패드의 회전속도가 같으면 웨이퍼의 전

체 접촉부위에서 연마패드에 대한 상대속도가 일정하게 유지되는 장점이 있다⁽¹³⁾. 이산화한 지배방정식의 해를 구하기 위해 웨이퍼를 반경방향으로는 20 개, 원주방향으로는 40 개의 등 간격의 격자로 나누었다. 수치적인 반복 계산에 의해 해가 구해지며 해석 오차는 0.01% 정도이다.

Fig. 4는 가공 변수들의 표준 조건에서 연마액의 압력 분포를 해석한 결과이다. 웨이퍼의 중심에서 연마패드 중심의 반대 방향으로 약간 떨어진 곳에서 압력이 가장 높고 가장자리로 갈수록 압력이 감소하다가 모서리에서는 대기압으로 되는 것을 알 수 있다. 전단 응력들의 해석 경우에도 3 차원 비대칭 분포가 얻어졌다. 웨이퍼 중심에 대해 같은 반경에 위치한 웨이퍼 지점들은 회전 주기마다 동일한 압력 및 전단응력 변화를 거치게 된다.

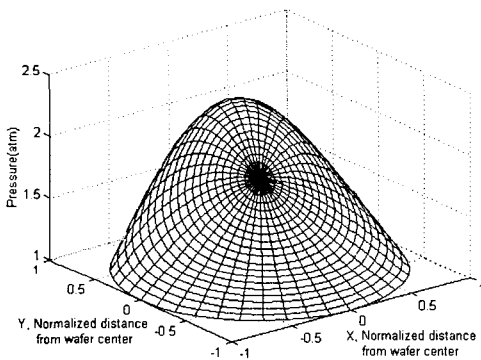


Fig. 4 Pressure distribution

웨이퍼 중심에 대해 같은 반경 만큼 떨어진 지점들에 작용하는 압력과 응력들의 평균값을 원주방향($\theta=0\sim 2\pi$)으로 구하여 도표로 표시하였다. Fig. 5는 가공하중 변화에 따른 연마액 압력 및 웨이퍼 면에 작용하는 전단 응력들을 나타낸다. 전단 응력은 중심부에서 최소값을 가지며 가장자리로 갈수록 증가되는 형태를 보이고 있다. 원주 방향 전단 응력은 반경방향 전단응력에 비해 훨씬 작은 값을 가진다. 가공하중이 전단 응력 보다는 압력에 큰 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 가공하중이 작아질수록, 평균 압력은 감소하면서 크기가 일정한 구간이 증가하며 평균 전단 응력의 경우에는 반경방향 성분의 최대값은 조금 커지고 원주방향 성분의 최소값은 조금 작아진다.

웨이퍼와 연마패드의 회전속도, 즉 상대속도의 변화에 따른 평균 압력 및 평균 전단 응력들의 분

포 양상은 Fig. 6에서와 같다. 상대속도가 증가됨에 따라 반경방향 전단 응력은 커지지만 원주방향 전단 응력은 작아진다. 이와 같은 현상은 상대속도가 증가됨에 따라 연마액에 작용하는 원심력이 커지기 때문이라 여겨진다. 압력 분포에 대해서는 상대속도가 크게 영향이 미치지 못하는 것 같다.

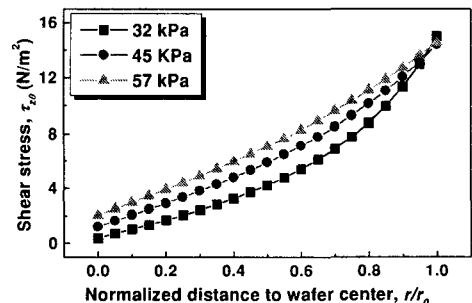
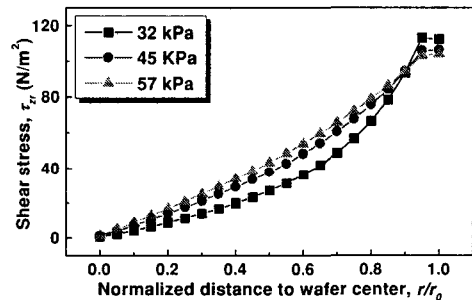
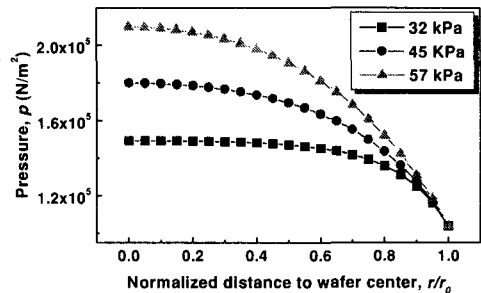


Fig. 5 Mean (a, top) pressure, shear stress (b, center) τ_z , and (c, bottom) τ_θ with the variation of down force ($\omega=60\text{rpm}$, $\mu=0.004\text{Pa s}$)

연마액의 점도에 따른 평균 압력 및 평균 전단 응력들의 변화는 Fig. 7과 같다. 점도가 증가할

수록 전단 응력들이 증가되어 중심부와 가장자리 사이의 크기 차이가 증가되고 있다. 이것은 전단 응력들은 점도 크기에 비례하기 때문인 것 같다. 압력 분포는 비교적 점도의 영향을 적게 받는 편이다.

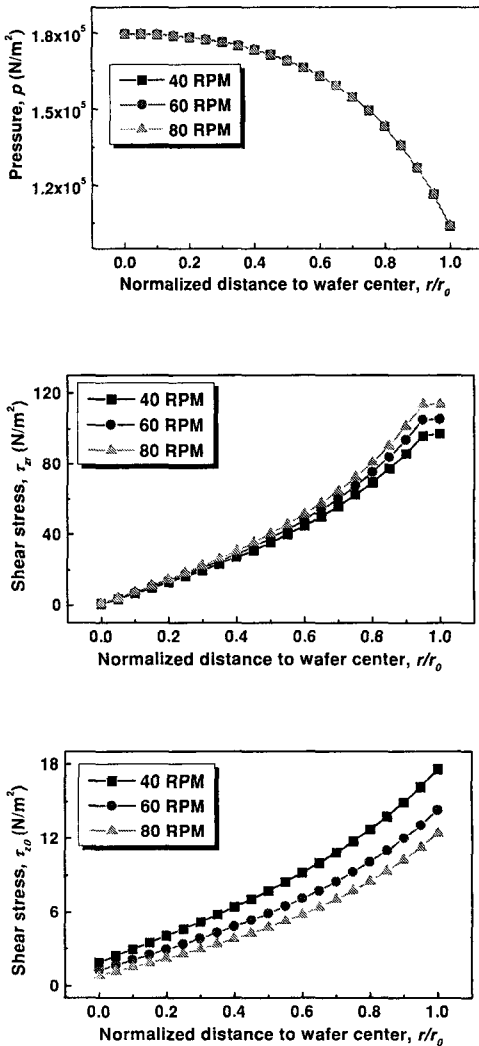


Fig. 6 Mean (a, top) pressure, shear stress (b, center) τ_{zr} , and (c, bottom) $\tau_{z\theta}$ with the variation of rotation speed ($W_f=45\text{kPa}$, $\mu=0.004\text{Pa s}$)

윤활역학적으로 모델링할 때에 연마패드는 매끄러운 경면이며 연마액은 액체로만 이루어진 뉴턴 유체라고 가정하였지만, 실제 CMP 공정에서의

연마패드는 어느 정도 표면 거칠기가 있으며 연마액 내에는 연삭입자들이 존재하고 있다. 따라서 해석 결과가 정량적으로 정확하다고 할 수 없을 것이다. 다만 해석결과가 CMP 공정의 완전유휴 형태에 대한 정성적인 이해에 도움이 될 수 있겠다. CMP 공정의 완전유휴 형태 해석결과에 의하면 웨이퍼 중앙부에서는 연마액의 압력이, 가장자리에서는 전단 응력이 각각 크게 작용하는 것이 특징이다.

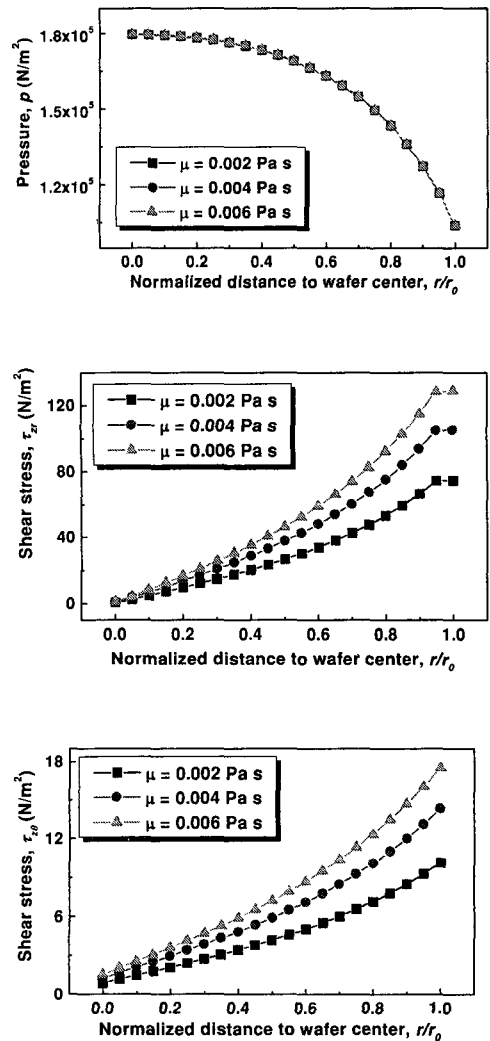


Fig. 7 Mean (a, top) pressure, shear stress (b, center) τ_{zr} , and (c, bottom) $\tau_{z\theta}$ with the variation of viscosity ($W_f=45\text{kPa}$, $\omega=60\text{rpm}$)

웨이퍼의 절연 산화막을 화학기계적연마를 할 때에 기존의 가공 조건 보다 낮은 가공하중과 빠른 회전속도로 하면 웨이퍼 가공면의 평탄화가 향상된다고 보고되고 있다⁽¹⁴⁾. 그리고 가공하중을 작게 하고 회전속도를 빠르게 하면 연마액 유막 두께가 커진다는 해석결과가 있다⁽¹¹⁾. 가공하중을 작게하고 회전속도를 증가시키다 완전윤활 형태가 된다면, Fig. 5 와 Fig. 6 에서와 같이 웨이퍼 중앙부에서는 연마액 압력이 일정하게 유지되는 면적이 넓어지고 웨이퍼 가장자리에서는 반경방향 전단 응력이 조금 증가되는 양상을 띄게 될 것이다.

4. 결론

화학기계적연마의 윤활역학적 해석에 의해 간접 접촉 경우의 연마액 압력 및 웨이퍼 면의 전단 응력에 대해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 웨이퍼의 일정 반경 지점에 대한 연마액의 평균 압력은 웨이퍼 중심에서 최대이며 가장자리로 갈수록 감소된다. 가공하중이 커질수록 압력도 증가된다. 상대속도와 연마액 점도는 압력에 미치는 영향이 적은 편이다.
- (2) 일정 반경에 대한 평균 전단 응력은 웨이퍼 중심부에서 최소이고 가장자리로 갈수록 커지며, 반경방향 성분이 원주방향 성분보다 훨씬 큰 편이다.
- (3) 반경방향 전단 응력은 가공하중이나 상대속도나 점도가 증가할수록 커지고, 원주방향 전단 응력은 가공하중이 증가하거나 상대속도가 늦어지거나 점도가 증가할수록 커진다.

후 기

이 논문은 1998 년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 정해도, "화학기계적 폴리싱(CMP)에 의한 층간 절연막의 광역 평탄화에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 11 호, pp. 46-56, 1996.
2. 이응숙, 강재훈, 신영재, 황경현, 이후상, 안대균, "CMP 장치의 설계 및 제작," 한국정밀공학

- 회 춘계학술대회논문집, pp. 951-954, 1998.
3. 박진구, 이상호, 김형균, "CMP 공정 후의 오염 제어," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 959-962, 1998.
4. Bhushan, M., Rouse, R., and Lukens, J.E., "Chemical-Mechanical Polishing in Semidirect Contact Mode," J. Electrochem. Soc., Vol. 142, No. 11, pp. 3845-3851, 1995.
5. 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.
6. Srinivasa-Murthy, C., Wang, D., Beaudoin, S.P., Bibby, T., Holland, K., and Cale, T.S., "Stress Distribution in Chemical Mechanical Polishing," Thin Solid Films, Vol. 308-309, pp. 533-537, 1997.
7. Runnel, S.R., Eyman, L.M., "Tribology analysis of Chemical Mechanical Polishing," J. Electrochem. Soc., Vol. 141, No. 6, pp. 1698-1701, 1994.
8. Runnels, S.R., "Feature-Scale Fluid-Based Erosion Modeling for Chemical Mechanical Polishing," J. Electrochem. Soc., Vol. 141, No. 7, pp. 1900-1904, 1994.
9. Tichy, J., Levert, J.A., Shan, L., and Danyluk, S., "Contact Mechanics and Lubrication Hydrodynamics of Chemical Mechanical Polishing," J. Electrochem. Soc., Vol. 146, No. 4, pp. 1523-1528, 1999.
10. Pinkus, O. and Sternlicht, B., Theory of Hydrodynamic Lubrication, McGraw Hill, pp. 1-23, 1961.
11. 박상신, 조철호, 안유민, "화학기계적 연마 가공에서의 윤활 특성 해석," 윤활학회지, Vol. 15, No. 1, pp. 90-97, 1999.
12. Morris, J.L., Computational Methods in Elementary Numerical Analysis, John Wiley & Sons, pp. 261-323, 1983.
13. Patrick, W.J., Guthrie, W.L., Standley, C.L., and Schiabile, P.M., "Application of Chemical Mechanical Polishing to Fabrication of VLSI Circuit Interconnections," J. Electrochem. Soc., Vol. 138, No. 6, pp. 1778-1784, 1991.
14. Dejule, R. "CMP Grows in Sophistication," Semiconductor International, Vol. 21, No. 13, pp. 56-62, 1998.