

실리콘 웨이퍼 연삭 가공의 기구학적 모델링과 해석

김상철, 이상직(부산대 대학원 정밀기계공학과), 정해도(부산대학교 기계공학부)

Kinematic Modeling and Analysis of Silicon Wafer Grinding Process

S.C.KIM, S.J.LEE (Graduated School of Precision and Mech. Eng., PNU)

H.D.JEONG (School of Mech. Eng., PNU)

ABSTRACT

General wheel mark in mono-crystalline silicon wafer grinding is able to be expected because it depends on radius ratio and angular velocity ratio of wafer and wheel. The pattern is predominantly determined by the contour of abrasive grits resulting from a relative motion. Although such a wheel mark is made uniform pattern if the process parameters are fixed, sub-surface defect is expected to be distributed non-uniformly because of characteristic of mono-crystalline silicon wafer that has diamond cubic crystal. Consequently it is considered that this phenomenon affects the following process. This paper focused on kinematic analysis of wafer grinding process and simulation program was developed to verify the effect of process variables on wheel mark. And finally, we were able to predict sub-surface defect distribution that considered characteristic of mono-crystalline silicon wafer

Key Words : Kinematic Modeling and Analysis(기구학적 모델링과 해석), Relative motion and velocity(상대 운동과 속도), Damage Distribution(결합 분포), Crystal Orientation Dependence(결정 구조의 의존성), Wafer Grinding(웨이퍼 연삭)

1. 서론

현재 주종을 이루고 있는 8인치 웨이퍼의 경우, 두께 편차(TTV : Total Thickness Variation) 1.3 μ m, 평탄도(Flatness) 0.5 μ m 이하가 요구되고 있으나, 직경 300mm인 12인치 웨이퍼에 대해서는 두께 편차(TTV) 0.8 μ m, 평탄도 0.4 μ m 이하를 요구하고 있는 실정이다. 이는 특히 디바이스 공정에서 다층 배선을 위한 평탄화에 대한 요구가 날로 심해짐에 따라, 디바이스 제조업체가 초기면을 이루는 Bare Wafer의 정밀도 규제를 강화하고 있기 때문이다. 현재 공정을 형성하고 있는 래핑, 에칭, 1,2,3 차 폴리싱으로는 이러한 요구조건을 충족시키기 어렵고 생산 단가도 높아져 가격경쟁이 힘들다, 웨이퍼 고정밀 연삭가공기술을 확보함으로써 surface grinding - final polishing 을 구현할 수 있으므로 제품 요구사항을 만족시키면서 생산효율 측면에서 상당한 이점을 가질 수 있다. 또한 고정밀 연삭 가공 기술은 웨이퍼 후면 연삭(back

grinding), Direct Bonded SOI 웨이퍼의 박막 형성, 화합물 반도체의 초정밀 경면 연삭 가공, 디바이스 직접 중 손상된 웨이퍼의 표면 재생 가공등에 절대적으로 필요한 기술이라 할 수 있다. [1] 그러나 연삭은 기계적 에너지를 이용한 제거가공이기 때문에 여러 가지 물리 화학적 결합을 발생시킨다. 그래서 이러한 표면에 발생하는 결합의 생성 원리와 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이 논문에서는 연삭 공정의 기구학적 모델링과 해석을 통해 입자 궤적을 나타내는 시뮬레이터를 제작하여 연삭 공정 변수에 따른 휠 마크를 해석하였고 또한 숫돌 입자의 상대 속도와 단결정 실리콘 웨이퍼의 결정 방향을 고려하여 표면 하부 결합의 불균일 분포를 예측하여 보았다.

2. 이론적 배경

움직이는 예리한 indenter 에 의해 발생하는 응력을 해석한 Mitchell solution은 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{F}{\pi r^2}\right)[f_{ij}(\theta, \phi)]_{\lambda, \mu} + \left(\frac{F'}{\pi r^2}\right)[g_{ij}(\theta, \phi)]_{\lambda, \mu} \quad (1)$$

여기서 F 는 법선 방향의 힘을, 그리고 F' 은 접선 방향의 힘을 나타내고, λ 와 μ 는 Lamé 상수를, r , θ 와 ϕ 는 극좌표를 나타낸다. [2]

Infeed 연삭 공정에서 F 는 절입 방향으로, 그리고 F' 는 상대 운동 방향으로, 각각 힘이 가해질 것이다. 여기서, 절입 방향은 일정하지만 상대 운동 방향은 일정하지 않으므로, 이상적인 공정 조건을 가정하여 F , F' 의 크기가 일정하다고 할지라도, F 의 방향은 일정한 반면에 F' 의 방향은 일정하지 않을 것이다. 그러므로 만약 웨이퍼 전면에 걸쳐 σ_{ij} 가 불균일 하다면 그것은 F' 의 방향인 상대운동 방향이 일정하지 않은 것에 기인할 수 있으며, 단결정 실리콘 웨이퍼가 <110>방향으로 Slip, Dislocation, Fracture 등이 잘 일어나는 결정 특성과 맞물려 고려될 수 있을 것이다. [3][4]

이 작업을 용이하게 수행하기 위해서는 몇 가지의 가정이 필요하다.

1. 스톨 폭은 스톨과 웨이퍼의 직경에 비해 충분히 얇아 선으로 가정할 수 있기 때문에, 스톨 상의 모든 입자의 운동 패턴은 같다고 가정한다.
2. 이상적인 상태를 가정하여 F 와 F' 의 크기는 각각 일정하다.
3. 웨이퍼와 스톨은 반시계 방향으로 회전한다.

3. 연삭 공정의 기구학적 해석

3.1 입자 궤적 방정식

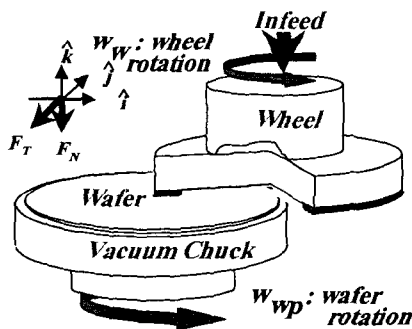


Fig. 1 Grinding Process in Silicon Wafer

연삭 공정은 휠과 웨이퍼의 회전운동으로 나타내어진다. 가정 1에 의해서, 스톨 상의 임의의 한 점을 모델링의 대상으로 삼아 좌표 방정식을 정리하면 다음과 같다.

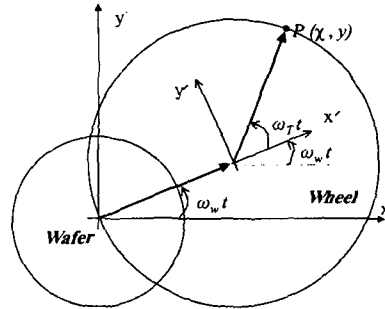


Fig. 2 Modeling(1) of Grinding Process

$$\vec{P} = P_x \vec{i} + P_y \vec{j} \quad \text{에서}$$

$$P_x = R_T \left[\cos \omega_w t + \cos \omega_T t \left(1 + \frac{\omega_w}{\omega_T} \right) \right] \quad (3)$$

$$P_y = R_T \left[\sin \omega_w t + \sin \omega_T t \left(1 + \frac{\omega_w}{\omega_T} \right) \right] \quad (4)$$

여기서 R_T 는 휠의 반경을, ω_w 와 ω_T 는 각각 웨이퍼와 휠의 위상과 각속도를 나타낸다.

식 (3), (4)에서 나타난 임의시간에 대한 입자의 위치 방정식은 휠 마크를 해석하는데 기본이 될 수 있다. 이것을 이용하여 시뮬레이터를 제작해 보면 공정 변수에 따른 각각의 휠 마크를 볼 수 있으며 휠 마크가 어떤 변수에 더욱 의존적인지에 대해 해석할 수 있을 것이다.

3.2 휠 마크 시뮬레이션

Fig. 3은 한 입자의 전체 경로를 나타낸 것이다. 입자 궤적 방정식에서도 알 수 있듯이 궤적 함수는 원의 형태가 아닌 복소 함수 형태인 것을 볼 수 있다.

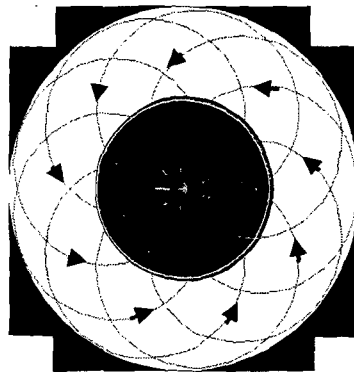
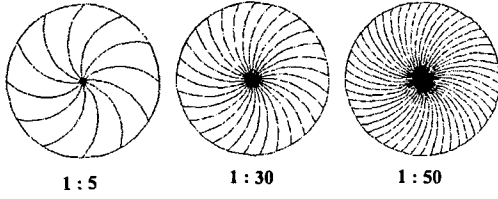
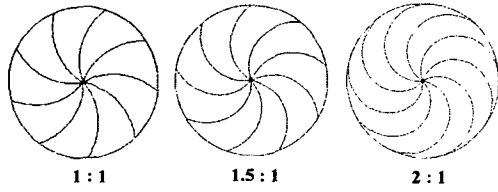


Fig. 3 Simulation of single grit's contour



(a) Effect of RPM ratio : (wafer : wheel)



(b) Effect of Radius ratio : (wafer : wheel)

Fig. 4 Wheel mark pattern

Fig. 4(a)는 웨이퍼와 연삭 슷들의 회전 속도비에 따른 휠 마크를 나타낸 것이다. 입자가 연속적으로 무수히 많이 분포되어 있음을 감안하여 궤적밀도의 차이를 고려하지 않는다면 그림에서 보듯 회전 속도비는 휠 마크의 형상에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Fig. 4(b)는 웨이퍼와 연삭 슷들의 반경비에 따른 휠 마크를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 연삭 슷들의 크기가 웨이퍼에 비해 작아 질수록 휠 마크의 곡률도 상대적으로 작아지는 것을 볼 수 있다. 휠 마크의 형상은 표면 결함 분포를 나타내므로 웨이퍼와 연삭 슷들의 반경비는 결함 분포에 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

4. 상대 운동과 결정 방향에의 의존성

4.1 상대 운동 방정식

웨이퍼에 대한 슷들 입자의 상대 운동 방정식을 쉽게 유도하기 위해 연삭 공정을 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

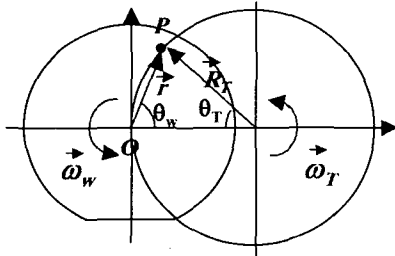


Fig. 5 Modeling(2) of Grinding Process

입자의 슷들 입자 P의 웨이퍼에 대한 상대 속도는 다음과 같다.

$$\vec{V}_{T/W} = \vec{\omega}_T \times \vec{R}_T - \vec{\omega}_w \times \vec{r} \quad (5)$$

x, y 각 성분에 대해서 다음과 같이 정리된다.

$$V_{(T/W)x} = r\omega_w \times \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{R_T}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times \left(1 - \frac{\omega_T}{\omega_w}\right) \quad (6)$$

$$V_{(T/W)y} = -\left[\frac{1}{2} \omega_w \left(\frac{r^2}{R_T}\right) \left(1 - \frac{\omega_T}{\omega_w}\right) + R_T \omega_T\right] \quad (7)$$

식 (6), (7)에서 볼 수 있는 것과 같이 웨이퍼에 대한 슷들 입자의 상대속도는 웨이퍼와 연삭 슷들의 회전속도비(ω_T/ω_w)와 슷들 반경에 대한 웨이퍼 중심에서의 임의 반경비(r/R_T)에 대한 함수이다.

4.1.1 상대 운동의 크기

Fig. 6은 웨이퍼와 연삭 슷들의 회전 속도비에 따른 웨이퍼 반경상의 상대 속도를 정성적으로 나타낸 것이다. 웨이퍼와 슷들의 회전 속도비가 커질수록 웨이퍼 중심과 웨이퍼 최외각에서의 상대속도비 차이는 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 웨이퍼 중심과 최외각 간의 상대속도 크기차는 2% 이하가 된다는 것을 볼 수 있다. 이는 주위진 공정변수에서, 슷들입자의 상대속도는 웨이퍼 전면에 걸쳐 균일하다는 새로운 가정을 세울 수 있게 한다.

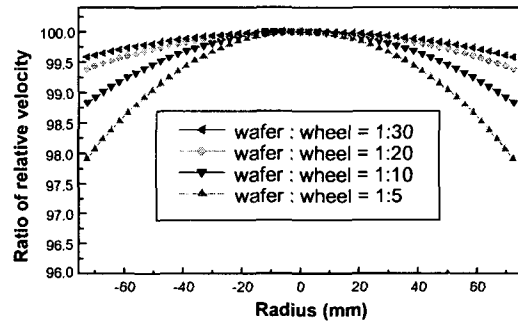


Fig. 6 Relative velocity in wafer according to RPM ratio of wafer and Wheel

4.1.2 상대 운동의 방향과 결정 방향

상대 운동 방정식을 통하여 정리한 상대 운동 방향은 다음과 같다.

$$\theta_{(T/W)} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{(T/W)x}}{V_{(T/W)y}} \right) \quad (8)$$

상대 속도 방향은 표면 하부 결함의 분포에 대한 해석에 있어서 중요한 의미를 갖는 것으로 사료된다. 앞에서 언급한 것과 같이 실리콘 단결정의 결정 특성상 <110> 방향으로 slip, dislocation, fracture 등이 쉽게 일어나므로, 같은 크기의 상대 속도에서도 상대 속도 방향에 따라 웨이퍼의 결함 크기가 달라질 것으로 예상되기 때문이다. 상대 속도 방향을 고려하여 표면하부 결함의 불균일 분포를 이론적 해석으로 작성한 시뮬레이터를 이용하여 예측할 수 있었다. 시뮬레이터 작성을 용이하게 하기 위해 다음의

가정을 추가하였다.

1. 상대 속도를 $\langle 110 \rangle$ 방향 벡터 (\vec{i}, \vec{j}) 로 표시할 때, 두 성분 중 큰 성분을 상대속도의 크기와 방향으로 취한다.

4.2 상대 속도 분포 시뮬레이션

Fig. 7은 단결정 실리콘의 결정 방향과 상대 속도 방향을 고려하여 표면 하부 결함 분포를 상대적인 수치로 나타낸 것이다. 결함 크기가 궤적 밀도에 비례하여 나타난다고 한다면 Fig. 4에서 보는 것과 같이 같은 반경을 가지는 부분은 일정한 결함 크기를 가진다고 할 수 있다.[5] 하지만 Fig. 7에 나타나듯 궤적 밀도뿐만 아니라 결정 방향에 대한 의존성까지 고려해 결함 크기를 예상한다면 같은 반경 상에서도 다른 크기의 결함 분포를 예상할 수 있을 것이다.

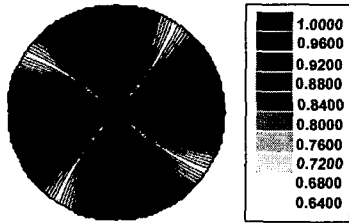
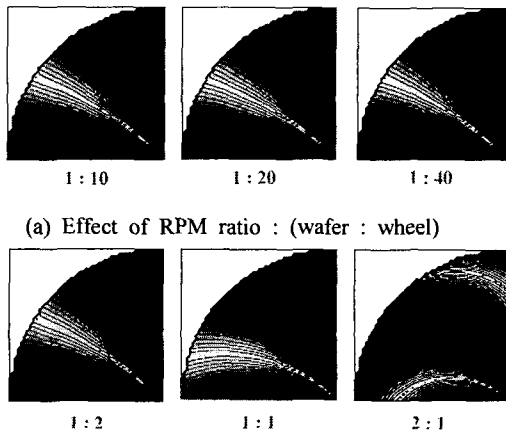


Fig. 7 Distribution of damage in sub-surface

이런 불균일 분포는 이후 공정에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다. 결함이 큰 부분에서 에칭 반응이 더 많이 일어나거나 폴리싱시 공정의 집중이 일어날 것으로 예상되기 때문이다. 이런 현상으로 인해 불균일한 표면이 생성될 것으로 예상되며 따라서 이후 공정을 설계할 때 고려가 되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 8은 공정 변수에 의해 결함의 불균일 분포의 형태가 변화함을 보여준다.



(a) Effect of RPM ratio : (wafer : wheel)

(b) Effect of radius ratio : (wafer : wheel)

Fig. 8 Predict of damage distribution

5. 결론

1. 공정 변수에 대한 휠 마크의 형태를 시뮬레이션을 통하여 예측해 보았으며 그 형태는 회전 속도 비 보다는 반경비에 의해 더 큰 영향을 받을 것으로 나타났다.

2. 웨이퍼에 대한 슷돌 입자의 상대속도는 웨이퍼 중심부가 외부보다 크게 나타나는 경향을 보였으나 그 차이는 아주 작았으며, 속도비가 증가할수록 속도의 차이는 더욱 줄어드는 것으로 예상되었다.

3. 단결정 실리콘 웨이퍼의 결정 특성에 의해 웨이퍼의 표면하부 결함 분포는 같은 반경에서도 다르게 나타날 것으로 예상되었으며 이런 현상은 차후 공정에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

이 논문에서 언급한 휠 마크나 표면 하부 결함 분포는 그 형태도 중요하지만 그에 못지 않게 크기도 중요하다. 형태는 웨이퍼와 연삭 슷돌의 반경비와 크기비에 대한 함수이지만 크기는 슷돌의 입도와 헤드의 절입량, 연삭 슷돌의 회전 속도에 대한 함수일 것으로 예측된다. 따라서 기구학적 해석과 병행하여 동역학적 해석을 할 필요가 있을 것이다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 중기거점사업인 "고기능성 부품 가공용 지능형 연삭 시스템"의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. H.OISHI "400mm-Diameter wafer qualities from slicing to grinding" *Advances in Abrasive Technology*, Vol. 3 , pp. 29-36, 2000
2. J. C. Conway, Jr, H. P. Kirchner "The mechanics of crack initiation and propagation beneath a moving sharp indenter" *Journal of Materials science*, Vol 15, pp. 2879-2883, 1980
3. R.Komanduri(1), N. Chandrasekaran, L. M. Raff "Orientation Effects in Nanometric Cutting of Single Crystal Materials : An MD Simulation Approach" *Annals of CIRP*, Vol 48, pp. 67-72, 1998
4. Winston S. Blackley and Ronald O. Scattergood "Crystal Orientation Dependence of Machining Damage-A Stress Model" *J. Am. Ceram. soc.*, Vol 73-13, pp. 3113-3115, 1990
5. P. L. TSO, W. J. LIAO "A study of surface profile on grinding of silicon wafer" *Advance in Abrasive Technology*, Vol 3, pp. 219-225, 2000