

실리콘 웨이퍼 연삭의 형상 시뮬레이션

김상철*, 이상직(부산대학교 정밀기계공학과), 정해도(부산대학교 기계공학부), 최현중,
이석우(한국생산기술연구원)

Profile Simulation in Mono-crystalline Silicon Wafer Grinding

S. C. Kim, S. J. Lee (Graduated School of Precision and Mech. Eng., PNU),
H. D. Jeong (School of Mech. Eng., PNU), H. Z. Choi, S. W. Lee (KITECH)

ABSTRACT

As the ultra precision grinding can be applied to wafering process by the refinement of the abrasive, the development of high stiffness equipment and grinding skill, the conventional wafering process which consists of lapping, etching, 1st, 2nd and 3rd polishing could be exchanged to the new process which consists of precision surface grinding, final polishing and post cleaning. Especially, the ultra precision grinding of wafer improves the flatness of wafer and the efficiency of production. Furthermore, it has been not only used in bare wafer grinding, but also applied to wafer back grinding and SOI wafer grinding. This paper focused on the flatness of the ground wafer. Generally, the ground wafer has concave profile because of the difference of wheel path density, grinding temperature and elastic deformation of the equipment. Tilting method is applied to avoid such non-uniform material removes. So, in this paper, the geometric analysis on grinding process is carried out, and then, we can predict the profile of the ground wafer by using profile simulation.

Key Words : Mono-crystalline Silicon wafer (단결정 실리콘 웨이퍼), Wafer grinding (웨이퍼 연삭), Wheel path density (휠 패스 밀도), Profile simulation (형상 시뮬레이션)

1. 서론

최근 반도체 산업은 끊임없는 발전을 거듭하여 마이크로 프로세서와 메모리를 비롯한 각종 반도체 디바이스는 점차 고집적화·고기능화 되어가고 있으며 패턴의 미세화만으로는 완전히 대처하기 곤란하므로 칩의 크기도 증가하고 있는 추세이다. 특히 디바이스 공정에서 다층 배선을 위한 평탄화에 대한 요구가 날로 심해짐에 따라, 현재 공정을 형성하고 있는 래핑, 에칭, 1, 2, 3차 폴리싱으로는 이러한 요구조건을 충족시키기 어렵고 생산 단가도 높아져 가격 경쟁이 힘들다. 웨이퍼 고정밀 연삭 가공 기술을 확보함으로써 surface grinding - final polishing - post cleaning을 구현할 수 있으므로 제품 요구 사양을 만족시키면서 생산 효율 측면에서 상당한 이점을 가질 수 있다. 또한 고정밀 연삭 가공 기술은 웨이퍼 후면 연삭(back grinding), Direct Bonded SOI 웨이퍼의 박

막 형성, 화합물 반도체의 초정밀 경면 연삭 가공, 디바이스 집적 중 손상된 웨이퍼의 표면 재생 가공 등에 절대적으로 필요한 기술이라 할 수 있다.

웨이퍼 연삭 공정이 여타 공정에 비해 상대적으로 평탄도 측면에서 우수한 장점을 지니고 있으나 이런 장점을 더욱 부각시키기 위해서는 공정 특성상 필연적으로 발생하는 휠 패스 밀도의 차이, 슛들의 변형 그리고 연삭열 분포등 불균일 요소에 대한 발생원인과 감소 방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 실제 연삭 가공된 웨이퍼를 측정해보면 중심부가 오목한 형상을 띄게 되며 이런 형상 오차는 디바이스 공정에서 로광시 초점심도의 오차를 높이게 되며 미세 패턴의 형성을 어렵게 한다.

따라서 본 연구에서는 평탄도에 악영향을 미치는 불균일 요소 중 가장 지배적인 영향을 미칠 것으로 사료되는 휠 패스 밀도를 기구학적 모델링을 통해

정리한 후 틸팅각을 이용하여 평탄도를 향상시키기 위해 형상 시뮬레이션을 작성하여 틸팅각의 변화에 따른 웨이퍼 형상을 예측해 보았다.

2. 본론

2.1 휠 패스 밀도와 재료 제거율

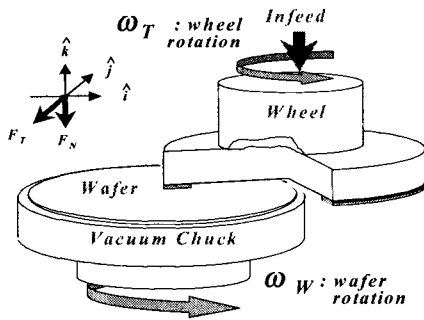


Fig. 1 Silicon wafer Grinding process

Fig. 1에서 보는 것과 같이 웨이퍼 연삭 가공은 휠과 웨이퍼의 회전운동과 휠의 절입으로 구성되어 있다. 휠과 웨이퍼가 항상 일정하게 접촉하여 연삭 저항이 일정하게 되도록 설계되었기 때문에 웨이퍼의 형상 정밀도와 표면 품질을 동시에 구현하면서 가공 능률을 높일 수 있다. 하지만 웨이퍼 연삭 가공의 기구학적 특성상 웨이퍼의 반경 방향에 대해 휠 입자의 패스 밀도, 연삭열 분포가 균일하지 않고 장비 및 스톱들의 변형에 의해서 웨이퍼의 평탄도에 악영향을 초래할 것으로 예상된다. 특히 휠 패스 밀도의 차이는 가장 지배적인 영향을 미칠 것으로 사료되며 연삭 가공된 웨이퍼의 중심부가 오목한 형상을 띄는 것은 휠 패스 밀도의 차이에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 휠 패스 밀도가 반경 방향으로 어떠한 분포를 지니는지 간단한 모델링을 통해 규명해 보았다.

반경 방향에 따른 휠 패스 밀도는 웨이퍼 중심으로부터 반경 r 의 위치에 있는 미소 면적 S_w 를 지나는 레적의 길이 S_a 로 정의할 수 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 S_a 는 웨이퍼의 반경에 따라 조금씩 커지는 경향을 보이나 그 정도는 미소하며, 현재 웨이퍼 가공에 쓰이는 입자의 직경이 수 μm 에서 수십 μm 에 불과하여 웨이퍼의 넓이에 비해 극히 미소한 양인 것을 감안하면 휠의 레적을 직선으로 가정할 수 있으며, 이로써 휠 패스 밀도를 아래와 같이 간략화하여 정리할 수 있다.

$$Density = \frac{S_a}{S_w} = \frac{D_a \times dr}{2\pi r \times dr} = K \left(\frac{1}{r} \right) \quad (1)$$

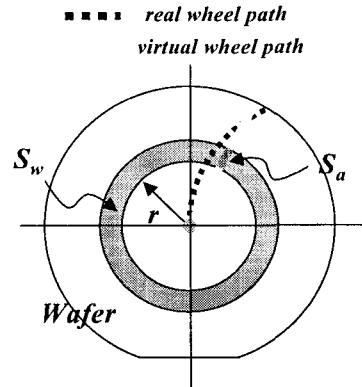


Fig. 2 Modeling of Wheel path density equation

여기서 K 는 휠 입자의 수, 휠 날의 넓이 등을 포함하는 비례계수이다. 반경 방향에 대한 휠 패스 밀도는 웨이퍼 중심에서의 거리 r 에 반비례하는 함수임을 알 수 있다. 따라서 휠 패스 밀도는 웨이퍼 중심부에서 가장 높고 외곽에서 가장 낮다. 일정한 양으로 점차적인 강제절입을 수행하는 In-feed 연삭에서 이런 휠 패스 밀도의 차이는 재료 제거율과 표면 거칠기에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

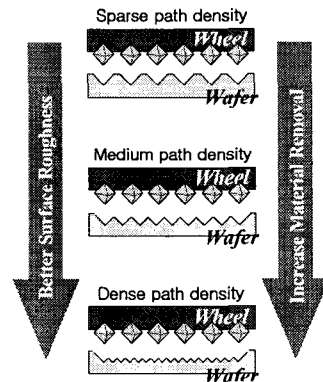


Fig. 3 Mechanism of wheel path density's effect

Fig. 3에서 보이는 메커니즘에 의해 휠 패스 밀도가 높을수록 재료 제거율이 높으며 따라서 오목한 형태의 가공물을 기대할 수 있다. 이것은 웨이퍼의 평탄도에 악영향을 미치는 요소이지만 언급하였듯이 공정 특성상 불가피하게 발생하는 현상이므로 이를 보완해 주기 위해서는 웨이퍼의 회전축과 휠의 회전축을 평행 상태가 아닌 약간의 틸팅각을 부여하는 방법이 있겠다.

2.2 형상 시뮬레이션

앞절에서 언급하였듯이 휠 패스 밀도를 비롯한 여러 가지 불균일 요소에 의해 웨이퍼 평탄도는 악화되는데 이것을 보완해 주는 방법으로 틸팅각을 부여하는 것을 들 수 있다. 웨이퍼와 휠의 회전축을 z축, 웨이퍼와 휠의 중심을 잇는 선을 y, 그리고 z와 y에 수직인 축을 x축이라 하였을 때 x와 y축의 회전시키면서 z축을 틸팅시킬 수 있으며, 이는 휠 입자가 웨이퍼면을 수평으로 가공하는 것이 아니기 때문에 임의의 가공 형상을 기대할 수 있을 것이다.

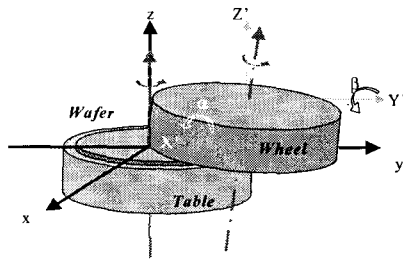


Fig. 4 Grinding wheel/wafer arrangement

틸팅을 하였을 때 틸팅각에 따라 예상되는 웨이퍼의 형상을 알아보기 위해 간단히 프로파일 방정식을 정리하였다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 웨이퍼 중심부와 휠과 닿는 웨이퍼 edge 부분을 각각 O, A, B 라 하였을 때 AB 전체를 가공하는 방법과 AO 부분만 가공하는 방법이 있는데, 축의 탄성 변형에 대한 효과를 감소시키면서 틸팅에 대한 효과를 높이기 위한 측면에서 후자가 유리할 것으로 보이며, 따라서 본 방정식은 후자의 방법을 모델링 하였다.

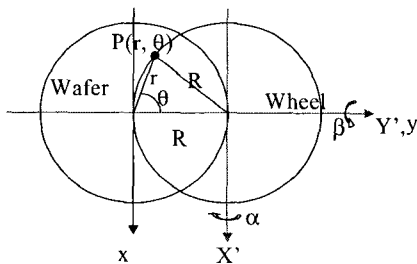


Fig. 5 Modeling of profile equation

웨이퍼 중심에서 임의의 거리 r에 위치하는 입자의 거리와 y축에서의 편각의 관계는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$R^2 = R^2 + r^2 - 2rR\cos\theta \quad \text{에서}$$

$$\theta = \tan^{-1}(r/2R) \quad (2)$$

식 (2)를 이용하면 휠 입자가 지나는 z축 방향의 높이는 다음과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$Z_{total} = Z_\alpha + Z_\beta \quad (3)$$

where,

$$Z_\alpha = -(R - 2R\cos\theta\cos\alpha)\sin\alpha$$

$$Z_\beta = -2R\cos\theta\sin\theta\sin\beta$$

여기서 α, β 는 각각 x, y축을 중심으로 회전시킨 양이며 R은 휠의 반경이다. Z_α 는 α 에 의한 형상 변화, Z_β 는 β 에 의한 형상 변화를 나타내며 최종 형상은 식 (3)과 같이 Z_α, Z_β 의 합으로 나타내어진다.

이 방정식을 이용하여 시뮬레이션을 작성해 보았다. Fig. 6는 α, β 의 효과를 보여준다. 그 결과 α, β 가 각각 양의 값일 때는 볼록한 형상을, 음의 값을 가질 때는 오목한 형태의 웨이퍼가 예상된다. 그러나 같은 볼록한 형상이라고 하더라도 그 형태가 조금씩 차이가 남을 알 수 있다. Fig.6-(a)와 (b)를 비교해보면 알 수 있듯이 α 를 변화시켰을 때에는 원뿔 형상이, β 를 변화시켰을 때에는 구 형상이 나타났다. 이를 이용하면 α, β 의 적당한 조합으로 다양한 형상의 웨이퍼를 만들어 낼 수 있을 것이다.

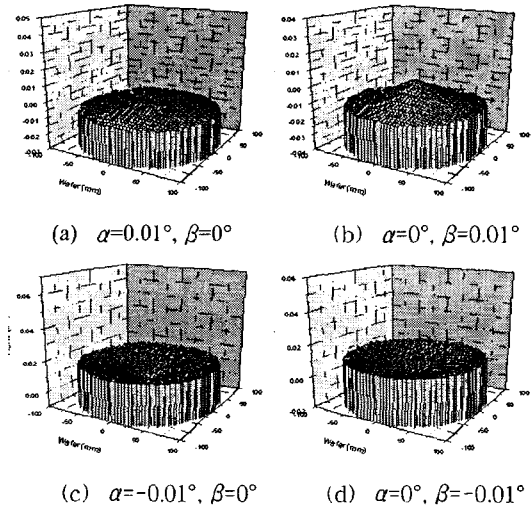
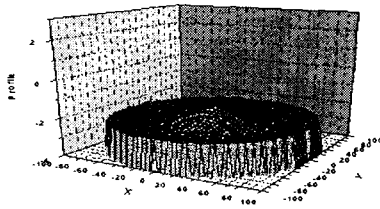


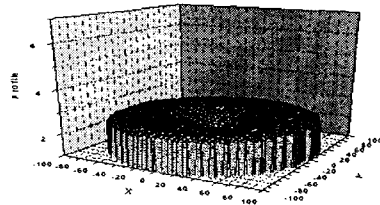
Fig. 6 Profile transition at different of α or β

Fig. 7는 α, β 의 적당한 조합으로 만들어지는 다양한 형상의 웨이퍼를 나타낸다. 언급하였듯이 휠 패스 밀도의 차이에 의해 중심부에서 오목해지는 경향과 후공정인 폴리싱 공정시 edge 부분이 과도하게 가공되는 것을 고려할 때 목표로 삼을 형태는 Fig. 7-(a) 또는 (c)의 형태가 될 것이다. Fig. 7-(a)와 (c)는 회전시키는 방향은 서로 동일하나 그 크기가 다르기 때문에 같은 형상을 지니지만 그 정도에서 차이가 남을 알 수 있다. 후공정인 폴리싱 공정은 장비와 사용 조건에 따라 가공 형상이 불규칙적으로 이루어져 예측하기 힘들다. 일반적으로 가공된 형상을 따르는 방향으로 그 정도를 심화시켜 평탄도를 악화시킨다. 따라서 연삭시에는 휠 패스 밀도의 효과를 보완

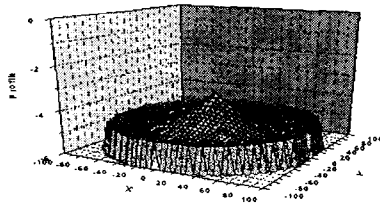
하면서 edge 부분을 제외한 부분은 최대한 평탄한 형상을 제조하는 것을 목적으로 삼는 것이 바람직할 것으로 보인다. 결국 웨이퍼의 형상은 α, β 의 비에 의해 결정됨을 알 수 있으며 그 크기는 휠 패스 밀도의 영향과 폴리싱 공정시 발생하는 Edge effects를 고려하여 결정될 수 있을 것이다.



(a) $\alpha = -0.01^\circ, \beta = 0.01^\circ$



(b) $\alpha = 0.01^\circ, \beta = -0.01^\circ$



(c) $\alpha = -0.02^\circ, \beta = 0.02^\circ$

Fig. 7 Profile transition at different combination of tilt angle

3. 결론

본 연구에서는 평탄도에 악영향을 미칠 것으로 사료되는 휠 패스 밀도를 정리해 보았고 이런 영향을 보완해 주기 위해 틸팅각을 부여하여 웨이퍼 형상을 임의로 제어하는 형상 시뮬레이션을 제작하였다. 그 결과 휠 패스 밀도는 $1/r$ 에 비례하는 것으로 나타났으며 휠 패스 밀도가 높을수록 재료 제거율이 높음을 고려할 때, 연삭 공정 후 웨이퍼가 오목해지는 현상은 그것에 기인할 것으로 사료되었다. 또한 형상 시뮬레이션을 구동해본 결과 α, β 의 값은 각각 웨이퍼를 오목하게 하거나 볼록하게 할 수 있으나 그 형태는 달랐으며 α, β 의 적당한 조합으로 다양한

형상의 웨이퍼를 기대할 수 있었으며 휠 패스 밀도와 후 공정을 고려하여 적당한 조합으로 웨이퍼의 평탄도를 향상시킬 수 있을 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이론적으로 웨이퍼의 평탄도에 대한 고찰을 수행하였으나 실제 웨이퍼의 평탄도 실험을 통해 이를 검증하는 과정이 필요할 것으로 사료되며 현재 진행중에 있다. 또한 본 논문에서는 평탄도에 영향을 미치는 인자중 휠 패스 밀도에 대해 연구하였으나 연삭열 분포 및 장비의 주축 및 휠의 탄성 변형에 대한 연구도 향후 이루어져야 할 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