

마스크에 대한 기계적 가공을 이용한 단결정 실리콘의 미세 패턴 가공

진원혁*, 김대은**

Selective Removal of Mask by Mechanical Cutting for Micro-patterning of Silicon

Won-Hyeog Jin* and Dae-Eun Kim**

ABSTRACT

Micro-fabrication techniques such as lithography and LIGA processes usually require large investment and are suitable for mass production. Therefore, there is a need for a new micro-fabrication technique that is flexible and more cost effective. In this paper a novel, economical and flexible method of producing micro-pattern on silicon wafer is presented. This method relies on selective removal of mask by mechanical cutting. Then micro-pattern is produced by chemical etching. V-shaped groove of about 3 μm wide and 2 μm deep has been made on SiO_2 coated silicon wafer with this method. This method may be utilized for making microstructures in MEMS application at low cost.

Key Words : Micro-machining (미세가공), MEMS (미세기전요소), Single crystal silicon wafer (단결정 실리콘웨이퍼), Anisotropic etching (이방성 에칭)

1. 서론

최근 정밀기계, 광학, 항공공학, 반도체 제조기술 및 전기전자 분야 등을 중심으로 급격하게 이루어지고 있는 가공기술의 발전은 기계요소 및 반도체 등의 설계·가공에 있어서 초정밀화를 요구하고 있다. 이러한 세계적인 연구 추세는 국내외적으로 초정밀 가공에 대해 많은 관심을 불러일으키면서 초정밀가공 관련기술이 국가적으로 주요 핵심기반기술로 자리잡게 되었고, 이들 연구는 나노테크놀러지에 대비한 기반기술 확보의 바탕이 되고 있다^{(1), (2)}.

초정밀 가공에 대한 연구는 크게 선삭, 연삭, 폴리싱, 래핑과 같은 기존의 절삭가공에서 발전한 초정밀 기계가공에 대한 연구와 레이저 가공, 이온빔 가공, 방전 가공, 플라즈마 가공, 화학적 에칭가공 등의 특수 가공 기술에 대한 연구로 나누어 볼 수 있다. 기계적 가공 분야에서는 초정밀 선삭, 연삭 등을 통해 표면 조도가 나노미터 수준의 표면을 가공한 결과들이 보고되고 있으며, 기계적 가공이 어려운 취성 재료에 대해서도 절삭 깊이 (cutting depth)를 임계값 이하로 가공하게 되면 소성 가공이 가능하다는 결과가 발표되었으며, 이러한 미소 절삭에 대한 연구로서 분자 동력학

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

(molecular dynamics)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 (simulation)을 통해 나노미터 단위 절삭에 대한 해석결과도 제시되고 있다^{(3)~(6)}. 그러나 초미세 절삭 가공은 아직 절삭 조건이나 절삭 상태 등의 가공 메커니즘에 대한 기초적인 연구가 부족하며 특히 미세기계요소들의 가공에 적용하기에는 어려운 것이 사실이다. 이러한 초정밀 기계가공 이외에도 최근 각광받고 있는 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 분야에서 미세기계요소들의 제작을 위해 다양한 특수 가공법들이 응용되고 있다^{(7)~(9)}. 특히 반도체 제조공정에서 사용되는 리소그래피 기술을 광범위하게 사용하여 3차원적 형상을 제작하기도 하였고^{(9)~(11)}, 미세 성형 기술인 LIGA 공정도 최근 독일에서 개발되어 미소 3차원 형상물을 제작하는데 응용되고 있다^{(11)~(13)}. 그러나 이러한 기술은 초기 시설비 투자가 많이 들고, 공정특성상 다단계의 마스크 공정과 에칭 공정을 필요로 하여 단품종 대량생산에는 적합하나, 다품종 소량생산에는 불리하다는 단점이 있다.

이러한 기존 초정밀 가공법의 단점들을 극복하기 위하여 실리콘웨이퍼에 대해 기계적인 방법과 화학적인 방법을 조합한 새로운 가공법이 개발되기도 하였으나, 이 방법에 의해 가공을 할 경우 화학적 가공에서 가공이 선택적으로 진행되는 것이지만 가공되지 않아야 할 부위도 화학적 에칭에 의한 재료의 제거가 일어나게 되어 좋은 표면 품질을 얻을 수 없는 단점이 있다⁽¹⁴⁾.

이에 본 연구에서는 기존의 미세 가공법들이 지니는 단점을 극복하고, 기계적인 방법과 화학적인 방법을 조합한 가공법을 보완하기 위하여 새로운 가공법을 제안하고자 한다⁽¹⁵⁾. 본 연구에서 개발한 미세 가공법은 Fig. 1 과 같이 가공하고자 하는 실리콘웨이퍼의 표면에 보호막을 코팅한 후 기계적인 방법으로 패턴을 가공하여 마스크를 선택적으로 제거하고, 화학적인 에칭을 통해 재료를 제거하여 패턴을 형성시킨 후 마스크를 제거하여 패턴을 완성함으로써 신뢰성 있고 유연한 미세 패턴의 가공을 가능하게 하는 기술이다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 피삭재에 대한 기계적 가공을

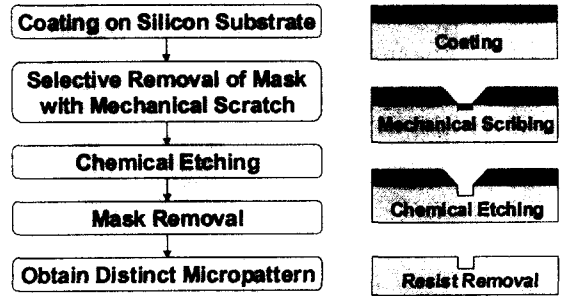


Fig. 1 Strategy of micro-machining process

위해 Fig. 2 와 같은 미세 패턴 가공장치를 설계·제작하였다. 기계적인 방법으로 패턴을 가공하기 위하여 공구부는 고정되어 있고 공작물이 놓여 있는 X-Y stage 를 이송함으로써 공구와 공작물 사이에 상대운동을 발생시키는 방식을 사용하였다. 배분력 및 절삭력을 측정하기 위하여 공구 고정부인 load beam 에 반도체 스트레인 게이지를 부착하였으며, 각 신호는 스트레인 게이지 앰프를 통하여 증폭되고 A/D 보드를 장착한 개인용 컴퓨터에 저장된다. X-Y stage 를 이송하기 위해 개인용 컴퓨터를 통해 위치 및 속도 제어가 가능한 해상도 60 nm의 linear actuator 를 사용하였으며 공구가 부착된 Z stage 를 마이크로미터로 이송시켜 가공을 위한 하중을 부과하였다. 기계적 가공 공구로는 끝단 반경이 5 μm 이며, 경도가 약 8000~10000 HV (kg/mm^2)인 다이아몬드 팁을 사용하였다.

마스크에 대한 1차적인 기계적 가공 이후 화학적인 가공을 위하여 사용한 에칭시스템은 Fig. 3 에 개략적으로 나타내었다. 에칭액이 채워진 비커를 일정온도로 조절되고 있는 수조 안에 위치시켜 습식 에칭을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 에칭액으로는 단결정 실리콘 재료에 대해 이방성 에칭 특성을 지니는 KOH 용액과 17 ml ethylenediamine, 3 g pyrocatecol, 8 ml water 의 비율로 혼합한 EDP 용액을 사용하였다. 두 가지 에칭액에 대해 모두 손으로 교반을 하면서 80°C의 온도에서 5분간 에칭하였다. 이때의 에칭율은 KOH 용액의 경우 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$, EDP 용액의 경우는 0.8 $\mu\text{m}/\text{min}$ 정도이다⁽¹⁶⁾.

2.2 실험시편

실험 시편으로는 결정면이 (100)인 실리콘웨이

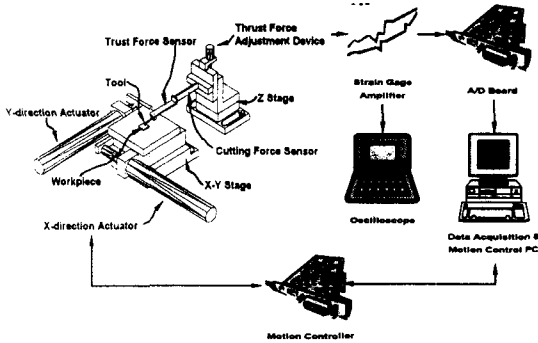


Fig. 2 Schematic diagram of ultra-precision micro-patterning machine

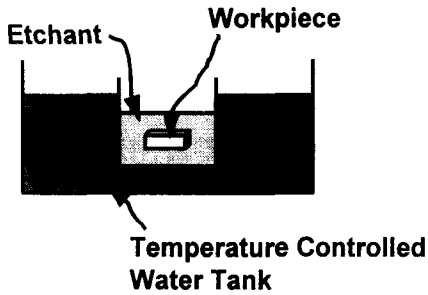


Fig. 3 Schematic view of the etching system

퍼 (p-type)를 사용하였다. 실리콘웨이퍼의 표면에 존재하는 유기물질을 제거하기 위하여 에탄올과 초음파세척기를 이용하여 세척하고, 산화막을 제거하기 위하여 2% HF 용액을 사용하여 표면을 1분간 에칭하였다.

금속재료의 마스크로는 열증착법에 의한 증착 특성과 기계적인 가공특성이 비교적 우수한 알루미늄 (Al)을 선정하였다. 순도 99% 이상인 Al 분말을 열증착법 (thermal evaporation)에 의해 실리콘웨이퍼의 표면에 코팅하였으며, 실험 시편으로는 Ra~10 nm인 실리콘웨이퍼의 연마된 표면에 증착된 Al 마스크 시편 (A), Al 마스크와 실리콘웨이퍼 사이의 흡착력을 증가시키기 위하여 400℃ 정도의 온도로 5분간 가열한 시편 (B), 표면 거칠기의 영향을 살펴보기 위하여 Ra~1000 nm인 연마되지 않은 실리콘웨이퍼의 뒷면에 증착한 Al 마스크 시편 (C)으로 선정하였다. 세라믹 재료의 마스크로는 현재 반도체 제조공정에서 흔히 마스크로 사용되고 있는 Si₃N₄ (D)와 SiO₂ (E)를 사용하였다. Si₃N₄ 마스크를 형성시키기 위해 실리콘웨이퍼의 표면에

Si₃N₄를 250 nm의 두께로 CVD (chemical vapor deposition) 방법으로 증착하였으며, 실리콘웨이퍼를 가열·산화시켜 80 nm의 두께의 SiO₂ 마스크를 실리콘웨이퍼의 표면에 형성시켰다. 각 시편에 대한 색인과 마스크의 조건을 table 1에 나타내었다.

Table 1 Specimen index and specification

Index	Mask Material	Thickness (nm)	Ra (nm)	Knoop Micro Hardness (GPa)	Coating Method
A	Al	Top	200	10	Thermal evaporation
B	Al	Top, heat induced	200	10	Thermal evaporation
C	Al	Bottom	200	1000	Thermal evaporation
D	Si ₃ N ₄	250	3-5	19.6	CVD
E	SiO ₂	80	3-5	5.4-7.4	Thermal growth

3. 결과 및 고찰

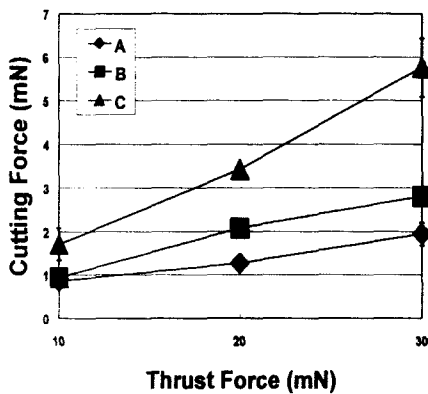
3.1 금속 마스크

일정한 배분력을 가한 상태에서 Al 마스크 시편 (A, B, C)에 대해 다이아몬드 공구로 기계적 가공을 수행하였으며, 이때의 절삭력을 측정하였다. 각각의 시편에 대해 10 μm/sec의 절삭 속도에서 10 mN에서 30 mN까지 10 mN 간격으로 배분력을 변화시키며 실험하였다. 이때 10 mN의 작은 하중에서도 Al 마스크 재료의 제거가 이루어져 기계적인 패턴의 가공이 가능하였다. 실험 결과는 각 경우에 대해 3회 이상 측정하여 그 평균값과 분산으로 나타내었으며, 배분력이 증가할 때 측정되는 절삭력과 배분력의 상대적인 크기의 변화를 보기 위해서 다음과 같이 절삭분력비를 정의하였다.

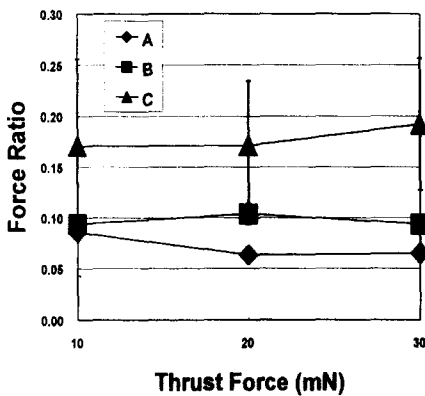
$$\text{절삭분력비 (Cutting Force)} = \frac{\text{배분력 (Thrust Force)}}{\text{절삭력 (Cutting Force)}} \quad (1)$$

Fig. 4는 A, B, C 시편에 대해 배분력에 따른 절삭력과 절삭분력비의 관계를 나타낸 그래프이다. 절삭력은 배분력의 증가에 따라 비교적 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, C의 경우 A와 B에 비해 큰 값을 지니며 그 증가 정도도 컸다. 절삭분력비는 0.05~0.2 정도의 비교적 작은 값을 나타내었으며, 배분력에 따른 절삭분력비의 변화가 거의 없었다. A와 B 시편은 유사한 조건을 지

고 있으므로 거의 같은 절삭분력비를 보였으나, B의 경우 가열에 의해 마스크와 실리콘 기판 사이의 흡착력이 증가하여 A에 비해 다소 큰 값을 나타냈다. C의 경우 다이아몬드 공구가 표면을 따라 이송될 때 표면요철에 의한 간섭효과가 나타나 절삭력의 순간적인 변화가 심하였으며 절삭분력비도 다른 경우에 비해 크게 나타나 표면 거칠기의 증가가 절삭력에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Effect of thrust force for various Al masks on (a) cutting force and (b) force ratio (cutting speed: 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$)

절삭 속도에 따른 절삭분력비의 변화를 살펴 보기 위해 가열한 50 nm 두께의 Al 마스크에 대해

0.14, 1, 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 절삭속도를 바꾸어 가며 실험하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 0.14 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 에서 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 절삭속도가 약 70배 증가하여도 절삭분력비는 큰 차이를 나타내지 않았다.

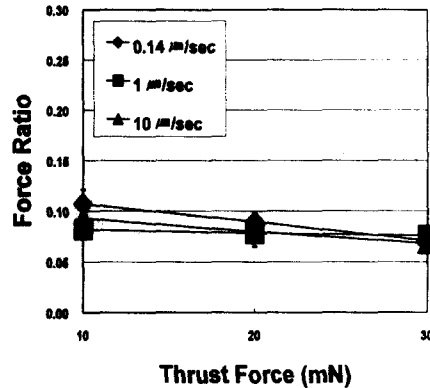


Fig. 5 Force ratio with respect to thrust force at different cutting speed for heat induced 50 nm thick Al mask

Fig. 6은 위의 A, B, C 시편에 대해 30 mN의 배분력과 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 절삭속도로 기계적 가공을 수행한 이후의 패턴과 B 시편에 대해 2차적으로 화학적 가공을 수행한 이후 패턴의 광학현미경 사진이다. Fig. 6a에서 보이는 바와 같이 A 시편에 대해 기계적으로 가공한 패턴은 Al 마스크의 박리현상이 심하게 나타나서 불규칙한 형상을 나타냈으며 C 시편의 경우도 같은 결과가 나왔다. 또한, A와 C의 경우 화학적인 에칭과정 중 Al 박막이 마스크로서 유지되지 못하고 에칭액에 녹거나 실리콘 웨이퍼의 표면에서 떨어져 나가 에칭 이후에는 뚜렷한 패턴을 찾기가 어려웠다.

이에 비해 가열하여 흡착력을 증가시킨 B 시편은 마스크의 표면이 산화되어 가열하지 않은 A 시편에 비해 검은색을 띄며 Fig. 6b에서와 같이 흡착력 증가로 인해 마스크의 박리현상을 방지할 수 있게 되어 규칙적인 패턴의 형상을 보였다. B 시편에 대한 에칭 가공 시에도 A, C 시편에 비해 Al 박막이 마스크로서 유지되는 경향이 커서 Fig. 6d, 6e 처럼 폭 25 μm 정도의 뚜렷한 패턴이 나타났다. 그러나 B의 경우도 마스크가 에칭 가공이

진행됨에 따라 녹거나 떨어져 이방성 에칭특성을 얻기가 어려웠으며, EDP 에칭액을 사용한 경우 약간의 이방성 에칭 특성이 나타나 3 차원의 패턴을 얻을 수 있었다.

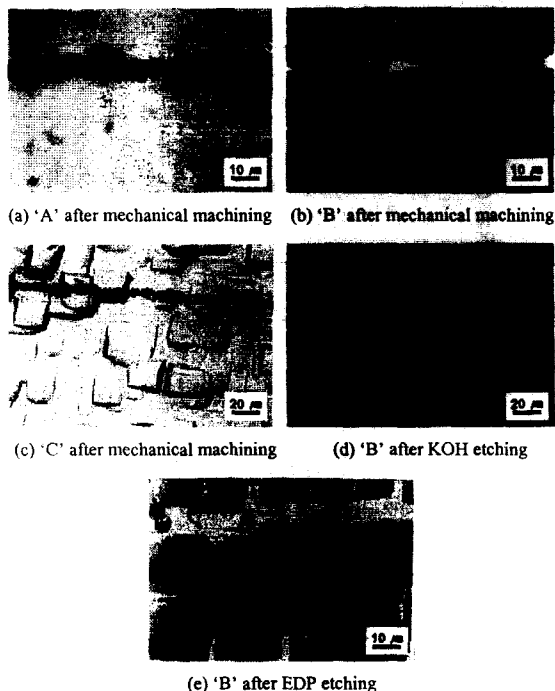


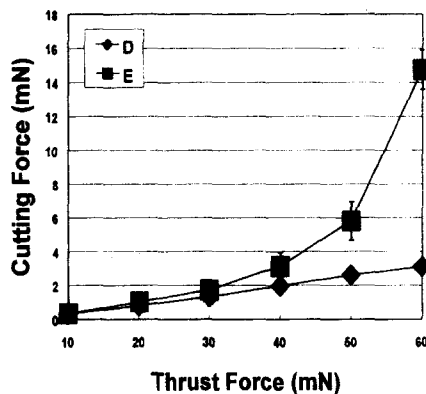
Fig. 6 Optical micrographs of pattern machined on Al coated silicon wafer (thrust force: 30 mN, cutting speed: 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$)

3.2 세라믹 마스크

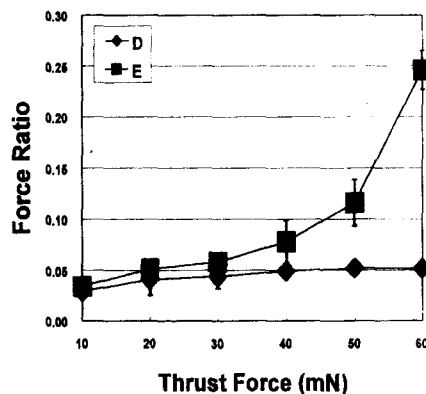
세라믹 재료인 Si_3N_4 (D)와 SiO_2 (E) 마스크를 형성시킨 시편에 대해서도 금속 마스크 시편에서와 동일한 실험을 수행하였다. 세라믹 시편의 경우 30 mN의 배분력을 가하여 가공했을 경우에도 패턴 가공을 위한 마스크의 제거가 완전히 이루어지지 않아 배분력을 10~60 mN 까지 변화시키며 실험하였다.

Fig. 7은 D와 E 시편에 대해 배분력에 따른 절삭력과 절삭분력비의 관계를 나타낸 그래프이다. D의 경우는 배분력의 변화에 따라 절삭력이 선형적으로 증가하였으며, 절삭분력비는 0.05 정도로 거의 일정하게 유지되었다. 이에 반해 E의 경우는 작은 배분력에서는 D와 비슷한 절삭력을 나타

내다가 50 mN 이상의 배분력 가해지자 절삭력이 급격히 증가하는 특징이 나타났으며 절삭분력비도 이와 비슷한 양상을 보였다. 이는 Si_3N_4 에 비해 SiO_2 가 낮은 경도값을 가지므로 배분력의 증가에 따라 다이아몬드 공구의 압입 정도가 커져서 절삭시 보다 많은 저항을 받기 때문이라 생각된다.



(a)



(b)

Fig. 7 Effect of thrust force for ceramic masks on (a) cutting force and (b) force ratio (cutting speed: 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$)

Fig. 8~9는 D, E 시편에 대해 20 mN, 60 mN의 배분력과 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 절삭 속도로 기계적 가공을 수행한 이후의 패턴과 2차적으로 화학적 가공을 수행한 이후 패턴의 광학현미경 사진이다. Fig. 8a, 8b, 8c, Fig. 9a, b, c에서와 같이 D, E 시편 모두 20

mN 이하의 비교적 작은 배분력이 가해졌을 때에는 마스크에 약간의 긁힘 흔적만 나타나 2차적인 화학적 에칭에 의한 재료의 제거가 이루어지지 않았다. 배분력을 50 mN 이상으로 증가시켰을 때 D 시편의 경우 Fig. 7d 처럼 마스크에 긁힘 흔적과 크랙 (crack)이 나타났으며, E 시편의 경우는 뚜렷한 패턴이 가공되며 칩이 발생하였으나 크랙의 발생은 없었다. 이처럼 기계적인 가공에 의해 형성된 패턴의 모양은 화학적 가공에 의해 형성된 패턴의 모양에도 영향을 미쳐 Si_3N_4 마스크를 사용한 경우는 불규칙한데 반해 SiO_2 마스크의 경우는 패턴의 형상이 아주 균일하였다.

기계적 가공에서의 배분력의 크기에 따라 화학적 에칭에서 실리콘 재료의 제거가 이루어지거나 그렇지 않은 현상에 대해 살펴보기 위하여 기계적 가공에 의한 마스크의 제거 여부를 SiO_2 마스크의 경우에 대해 관찰하였다. Fig. 10 에서와 같이 30 mN 과 60 mN 의 배분력에 대해 기계가공부위에서의 O 의 분포를 AES (Auger electron

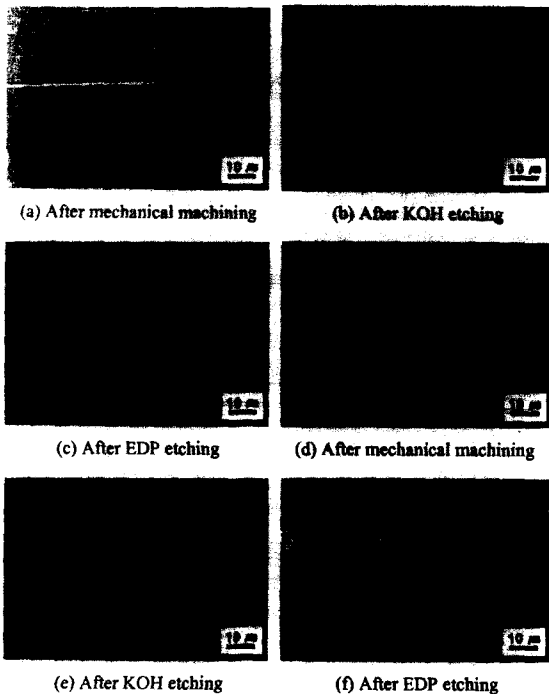


Fig. 8 Optical micrographs of pattern machined on Si_3N_4 coated silicon wafer (D) (thrust force; a, b, c: 20 mN, d, e, f: 60mN, cutting speed: 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$)

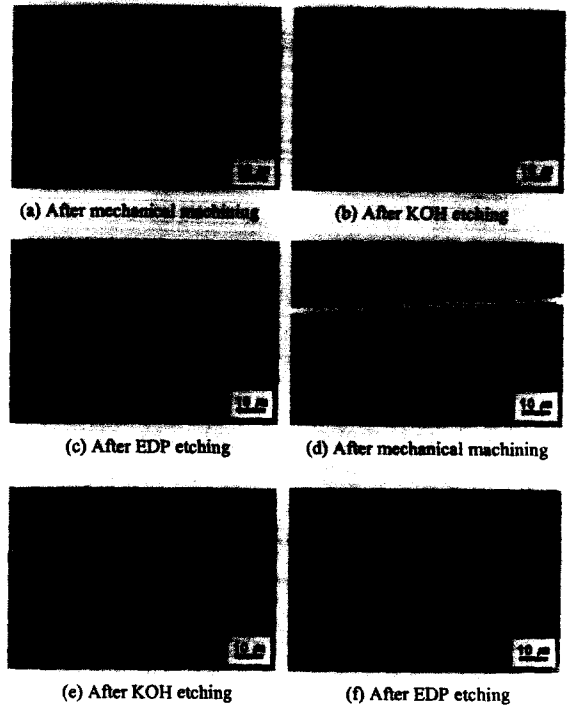


Fig. 9 Optical micrographs of pattern machined on SiO_2 coated silicon wafer (E) (thrust force; a, b, c: 20 mN, d, e, f: 60mN, cutting speed: 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$)

spectroscopy)를 이용하여 조사하였고, 동일한 시편을 에칭한 결과 60 mN의 배분력으로 가공한 시편에서만 실리콘 재료의 선택적인 제거가 일어났다.

Fig. 10에서 좌측 상단은 기계 가공된 패턴의 SEM 사진이고, 우측 하단은 동일한 부위에서 O 성분에 대해 AES mapping 한 사진이다. AES mapping 사진에서 밝게 나타나는 부위일수록 표면에서 O 성분의 함량이 많은 것을 나타내는데, Fig. 10b에서와 같이 60 mN의 배분력으로 기계 가공한 경우 가공 패턴부위가 어두운 색으로 나타나 O 성분이 거의 발견되지 않음을 알 수 있다. 따라서 60 mN의 배분력으로 기계 가공하였을 경우 SiO_2 마스크의 제거가 성공적이었음을 알 수 있다.

다음의 Fig. 11~12는 D, E 시편에 대해 본 가공법을 적용하여 제작한 미세 패턴의 SEM 사진이다.

Si_3N_4 를 마스크로 사용한 경우는 폭 8 μm , 깊이 4 μm 정도의 V형 패턴의 가공이 가능하였으나, 마스크 재료에 대한 기계적 가공시 크랙이 발생하여 에칭한 패턴의 형상이 균일하지 않았으며 가공

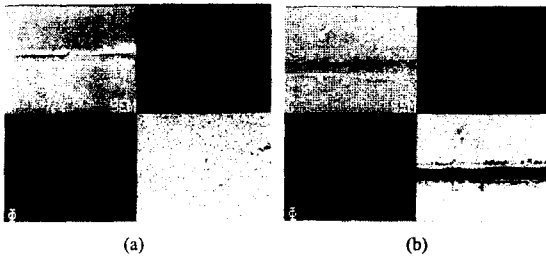


Fig. 10 AES mapping of O element on SiO₂ coated silicon wafer (a) 30 mN and (b) 60 mN thrust force

된 패턴의 표면 품질도 뛰어나지 않다. 이에 반해 SiO₂의 경우는 이방성 에칭의 특성이 잘 나타나 폭 3 μm, 깊이 2 μm 정도의 V형 패턴의 가공이 가능하였으며, 패턴의 형상이 균일하며 표면 품질도 우수함을 알 수 있다.

본 연구를 통하여 제시한 미세 패턴 가공법은 지금까지 세계적으로도 소개되지 않은 새로운 가공법으로서 리소그래피를 이용하는 반도체 제조공정 등의 기존 가공법에 비해 수십 배 정도의 장치 비용의 절감이 예상되며 보다 유연한 가공이 가능한 장점을 지닌다. 본 기술의 응용을 통하여 미세 유체채널, 광케이블 가이드, 미소 주형 등의 미세 구조물을 제작, 미세 일련번호의 식각, 미세 부품의 정렬을 위한 표식 제작 등이 가능하여 MEMS,

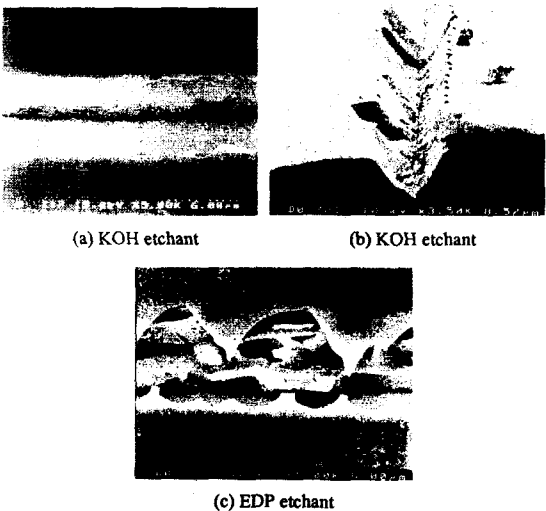


Fig. 11 SEM micrographs of the pattern machined on Si₃N₄ coated silicon wafer (thrust force: 60 mN)

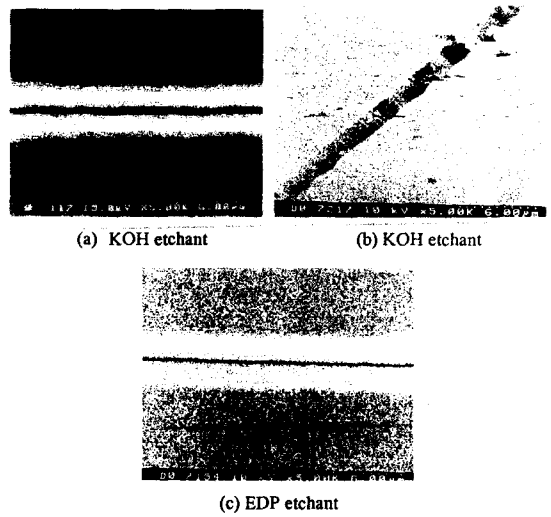


Fig. 12 SEM micrographs of the pattern machined on SiO₂ coated silicon wafer (thrust force: 60 mN)

초정밀 산업 분야 등에서 광범위 하게 사용되어질 수 있을 것이다.

4. 결론

기존의 미세 가공법들의 단점과 한계를 극복하고자 마스크에 대한 기계적 가공을 수행한 후 2차적으로 에칭을 통하여 실리콘 재료를 선택적으로 제거하여 마이크로 수준의 패턴을 만드는 새로운 가공법을 제시하였다. 본 연구에서는 미세 패턴 가공기를 설계 제작하여 Al, Si₃N₄, SiO₂ 마스크 재료에 대해 실험을 수행하였다. 본 실험의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al 마스크의 경우 마스크와 실리콘웨이퍼 사이의 흡착력을 증가시켜 폭 25 μm 정도의 패턴을 가공할 수 있었다.
2. 세라믹 마스크 재료의 경우 마스크로서의 특성이 우수하여 미소패턴의 제작이 가능하였으며, 특히 SiO₂의 경우는 폭 3 μm, 깊이 2 μm의 V 패턴을 저렴한 비용으로 가공하였다.
3. 본 가공법은 기존의 미세 가공 기술에 비해 초기 장치비의 절감이 가능하며, 유연한 가공이

가능하므로 MEMS 등의 첨단 분야에서 광범위하게 이용되리라 예상된다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술 연구조성비(기계공학 ME97-E-23)에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. McKeown, P. A., "The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future," *Annals of the CIRP*, Vol. 36, pp. 495 - 501, 1987.
2. Hiroyuky, F., "Present and Future Research Trend of Modern Micro-Machining Technology," *J. of KSME*, Vol. 33, pp. 483 - 498, 1993.
3. Ikawa, N., Donaldson, R. R., Komanduri, R., K nig, W., Aachen, T. H., McKeown, P. A., Moriwaki, T., and Stowers, I. F., "Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 587 - 594, 1991.
4. Venkatesh, V. C., Inasaki, I., Toenshof, H. K., Nakagawa, T., and Marinescu, I. D., "Observations on Polishing and Ultraprecision Machining of Semiconductor Substrate Materials," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 611 - 618, 1995.
5. Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., and Uchikoshi, J., "Structure of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis," *Annals of the CIRP*, Vol. 43, pp. 51 - 54, 1994.
6. Shimada, S., Ikawa, N., Inamura, T., Takezawa, N., Ohmori, H., and Sata, T., "Brittle-Ductile Transition Phenomena in Microindentation and Micromachining," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 523 - 526, 1995.
7. Qin, D., Xia, Y., Rogers, J. A., Jackman, R. J., Zhao, X. M., and Whitesides, G. M., "Microfabrication, Microstructures and Microsystems," *Topics in Current Chemistry*, Vol. 194, pp. 1 - 20, 1998.
8. Pottenger, M., Eyre, B., Kruglick, E., and Lin, G., "MEMS: The Maturing of a new technology," *Solid State Technol.*, Sep., pp. 89 - 96, 1997.
9. Miu, D. K., and Tai, Y., "Silicon Micromachined SCALED Technology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 42, pp. 234 - 239, 1995.
10. Temesvary, A., Wu, S., Hsieh, W. H., Tai, Y., and Miu, D. K., "Design, Fabrication, and Testing of Silicon Microimbals for Super-Compact Rigid Disk Drives," *J. of Microelectromechanical Systems*, Vol. 4, pp. 18 - 27, 1995.
11. Romankiw, L. T., "A Path: From Electroplating through Lithographic Masks in Electronics to LIGA in MEMS," *Electrochimica Acta*, Vol. 42, pp. 2985 - 3005, 1997.
12. Rogner, A., Eicher, J., Munchmeyer, D., Peters, R. P., and Mohr, J. "The LIGA Technique-What are the new opportunities," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 2, pp. 133 - 140, 1992.
13. Menz, W., "LIGA and Related Technologies for Industrial Application," *Sensors and Actuators A*, Vol. 54, pp. 785 - 789, 1996.
14. Kim, D. E. and Yi, J. J., "Micro-Patterning of Silicon by Frictional Interaction and Chemical Reaction", *J. of Tribology*, Vol. 120, pp. 353 - 357, 1998.
15. 진원혁, 김대은, "실리콘웨이퍼의 패턴가공을 위한 박막의 기계가공법," 대한민국 특허 출원 번호 10-98-016592, 1998.
16. Petersen, K. E., "Silicon as a Mechanical Material," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 70, pp. 420 - 457, 1982.