대한기계학회논문집(A) 제 20 권 제 10 호, pp. 3113~3125, 1996

〈논 문〉

기계 및 화학적 가공법을 이용한 신 미세가공기술

이재준* · 김대은**

(1996년 1월 12일 접수)

A Novel Micro-Machining Technique Using Mechanical and Chemical Methods

Jae-Joon Lee and Dae-Eun Kim

Key Words: Micro-Machining(마이크로가공), Etching(에칭), Micro-Patterns(미세패턴), Single Crystal Silicon Wafer(단결정 실리콘웨이퍼)

Abstract

The objective of this study is to develop a novel method named mechanical and chemical machining technique, which is capable of producing three dimensional patterns of few micrometers in dimension on a silicon wafer without the use of a mask. The strategy is to impart mechanical energy along the path of the pattern to be fabricated on a single crystal silicon by way of introducing frictional interaction under controlled conditions. Then, the surface is preferentially etched to reveal the areas that have been mechanically energized. Upon completion of the etching process, the three dimensional pattern is produced on the silicon surface. Experiments have been conducted to identify the optimal tool material, geometry, as well as fabrication conditions. The new technique introduced in this paper is significantly simpler than the conventional method which require sophisticated equipment and much time.

기 호 설 명

N : 배분력 (N)
F : 절삭력 (N)
R_1 : 공구의 날끝반경 (μm)
R_2 : 피삭재의 곡률반경 (μm)
a : Hertz 접촉원의 반경 (μm)
p : Hertz 접촉에서의 압력분포 (N/μm^2)
E' : 등가탄성계수 (N/μm^2)
E_1 : 공구의 탄성계수 (N/μm^2)
E_2 : 피삭재의 탄성계수 (N/μm^2)
w : 가공된 패턴의 폭 (μm)
d : Vickers 압흔의 대각선 길이 (μm)

그리스문자

ν_1 : 공구의 푸아송비
ν_2 : 피삭재의 푸아송비

*현대자동차 (주)
**회원, 연세대학교 기계공학과

1. 서 론

최근 정밀기계, 자동차, 항공우주 분야 및 반도체, 통신 분야 등을 중심으로 급격하게 이루어지고 있는 기술의 발전은 기계요소 및 반도체 등의 설계, 가공에 있어서 초정밀화를 요구하고 있으며, 이

러한 첨단 정밀가공기술의 확보를 위한 연구가 여러 각도에서 진행되고 있다.

초정밀 가공에 대한 연구는 크게 절삭, 연삭, 폴리싱, 래핑과 같은 기존의 절삭가공에서 발전한 초정밀 기계가공에 대한 연구와 레이저가공, 이온빔가공, 방전가공, 플라즈마가공, 화학적 에칭가공 등의 특수가공 기술에 대한 연구로 나누어 볼 수 있다.

기계적 가공분야에서는 초정밀 절삭, 연삭과 그 밖의 폴리싱, 래핑 등의 마무리 가공을 통해 표면조도가 나노미터 이하인 표면을 얻게 되었고, 이와 관련한 미소절삭에 대한 연구로서 computer simulation을 통해 원자 하나 크기의 수십 배에 지나지 않는 나노미터 단위 절삭에 대한 해석결과도 제시되고 있다.[1~4] 또한 미소절삭에 대한 실험적 접근방법으로서 미세한 날끝반경을 지닌 다이아몬드등의 팁을 사용하여 각종 재료에 대해 스크래치 또는 절삭실험을 행한 결과도 발표되고 있으며,[5,6] 초정밀 절삭가공에 의한 미세 홈 가공의 예로서 구리소재의 광학 메모리 디스크에 다이아몬드공구를 사용하여 수 마이크로미터 치수의 미세홈을 가공한 예가 있으나,[7] 절삭조건이라든지 그 절삭상태등의 가공 메카니즘에 대한 기초적인 연구가 아직 부족하며 특히 미세기계요소의 가공에 적용하기에는 어려운 것이 사실이다.

미세기계요소에 대한 연구는 특수가공 기술의 분야에서 더욱 두드러진 발전을 보여왔다. 특히 반도체 제조에 이용되고 있는 화학적 가공기술인 에칭은 미세기계요소의 제작에도 응용되어 MEMS (micro electro-mechanical-systems) 분야에 있어서 중요한 가공기술로 각광받고 있으며 근래에 새로이 X-선 리소그라피, electroplating, molding, casting 등의 공정을 차례로 적용하는 LIGA technique이 개발되어 복잡한 3차원적 형상을 지닌 미세기계요소의 생산이 가능하게 되었다. 그러나 이러한 기술들은 그 특성상 다단계의 마스킹공정을 필요로 하는데 현재 대부분의 경우에 사용되고 있는 광리소그라피 기술(photo-lithography technique)은 제품의 양산화에 유리하며 미세가공에 적합함에도 불구하고 별도의 청정실과 레이저, X선 등의 광원, 그리고 정렬(alignment) 등을 위한 고가설비를 필요로 하여 다품종 소량생산에는 불리하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 이제까지 별개의 것으로 인식되어 온 기계적 가공방법과 화학적 가공방법을 조합한 새로운 개념의 마이크로 가공기술을 제안하고 그 구체적인 예로서 주로 화학적 에칭가공에 의존해 왔던 단결정 실리콘 웨이퍼에 대한 미세 요철패턴의 가공에 적용하였다.

단결정 실리콘은 지금까지 전자산업에서 광범위하게 이용되어 온 소재로서 최근에는 기계요소의 가공소재로서의 가능성이 점차 부각되고 있다. 이는 화학적 에칭특성이 우수하여 미세가공에 적합하고 실리콘 자체의 전기-전자적인 성질을 이용한 기전 시스템(electro-mechanical system)의 제작이 용이하기 때문이다. 이러한 단결정 또는 다결정 실리콘을 소재로 하여 마이크로 액추에이터와 각종 센서류를 제작하려는 연구가 세계각국에서 진행되고 있다.[8~10]

가공된 미세 요철패턴은 미세기계요소에서 이용되는 유체채널, 광케이블의 가이드, 또는 마이크로 커넥터 등, MEMS 분야에 이용될 수 있으며, 또한 본 연구에서 제안된 기계-화학적 가공기술은 기존의 가공법과 다른 신기술로서 마스킹을 하지 않는 에칭가공이라는 점에서 다품종 소량생산에 적합한 장점이 있고, 기계적 가공만으로는 가공이 어려운 경취성 재료의 정밀가공에 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 기계적 가공과 화학적 가공을 조합한 미세가공기술(기계-화학적 가공기술)

이제까지의 연구에서는 기계적 가공과 화학적 가공은 별개의 것으로 인식되어 서로 다른 용도로 발전되어 왔다. 즉, 기존의 기계적 가공법에서의 초정밀 가공개념은 거시적인 가공, 예를 들면 평면가공, 비구면가공 등 표면조도나 진직도, 진원도 등을 개선하기 위한 표면가공기술로 제한되어 있었고 마이크로 단위의 치수를 갖는 미세요철의 가공이라든지 구멍가공 등은 광리소그라피 기술을 이용하여 복잡하고 고가인 화학가공에 의존해 왔다.

본 연구에서는 기계적 가공과 화학적 가공법을 조합한 새로운 개념의 가공기술을 제안한다. 즉 특정한 재질과 날끝형상을 지닌 공구를 이용하여 1차적인 기계가공을 행하고 2차적으로 에칭을 이용한 화학적 가공을 함으로써 원하는 치수의 미세 요철을 가공하는 것으로서 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

	1차 가공
가공 메카니즘	〈기계적 에너지 이용〉 공구로서 공구와 공작물 두 고체간에 미소표면전단응력을 유발시킴으로써 피삭재 표면에 미세한 잔류에너지를 유도한다. 이때 재료는 제거되지 않는다.
주요 가공변수	공구재질 공구의 날끝반경 수직하중
2차 가공	
가공 메카니즘	〈화학적 에너지 이용〉 에칭액으로 화학반응을 유도하는 과정으로써 기계적 가공에 의해 잔류표면에너지가 높아진 가공변질부위와 비가공부의 표면에너지 차이에 의해 선택적인 화학반응이 일어나며 실제적인 재료제거과정이다.
주요 가공변수	에칭액의 종류 에칭액의 농도 에칭온도 에칭시간 그밖의 환경조건

일반적으로 에칭가공은 마스킹(masking) 공정을 필요로 한다. 마스킹이란 공작물을 에칭액에 넣어서 용해제거할 때, 제거되지 않아야 할 부분을 보호하기 위한 피막의 패턴을 공작물의 표면에 입히는 것을 말하는 것으로써 이제까지의 에칭가공에서는 주로 에칭액에 용해되기 어려운 수지계의 리지스트(resist)를 도포하는 방법을 사용해 왔다. 공작물 표면에 고르게 도포된 리지스트 위에 사진기술을 이용하여 제작한 포토마스컨트(photo-maskant)를 사이에 두고 자외선 등의 광선을 조사함으로써 불용성패턴을 형성하고 조사되지 않은 부분의 리지스트를 용제를 사용하여 용해제거함으로써 임의의 리지스트패턴을 제작하는 것이다. 이때, 마스킹공정을 두가지로 구분할 수 있는데 첫째는 패턴부분이 에칭시에 에칭액과 접촉하여 제거가공되도록 하는 것으로서 정형마스킹(positive masking)이라 할 수 있으며, 두번째는 패턴부분이 에칭액으로부터 보호되어 돌출된 패턴이 가공되도록 하는 것으로 부형마스킹(negative masking)이라고 할 수 있다.

본 가공법에서 가장 중요한 점은 실제적인 제거가공은 2차적인 화학적 에칭가공을 통하여 이루어지며 기계적인 가공은 2차가공시의 선택적인 에칭을 위한 마스킹의 역할만을 한다는 점이다. 즉, 공구를 공작물에 접촉시킨 상태에서 비교적 작은 수직하중을 가하여 상대운동시킬때, 공구가 지나간 부분은 주어진 에너지만큼 표면층의 에너지가 상승하게 되고 표면에너지가 높은 부분은 상대적으로 에너지가 낮은 비가공부보다 화학반응을 일으키려는 경향성이 더 높기 때문에 2차적인 에칭가공시에 선택적인 화학반응이 일어나는 것이다. 실제로 여러가지 단결정 재질에 대해 에칭을 행한 실험결과들을 보면 표면의 기계적인 결함이 존재하는 곳은 그렇지 않은 부분과 다른 에칭상태를 나타내며, 결함부가 함몰하는 피팅(pitting)이나 또는 결함부가 다른 부분보다 솟아올라 힐록(hillock)이 발생하는 것을 알 수 있다.[11] 본 가공법에서는 이러한 결함을 경한 공구를 사용한 기계적인 가공을 통해 공작물 표면에 미리 생성시킴으로써 2차적인 화학가공을 위한 마스킹을 하는 것이라고 할 수 있으며 이때의 마스킹은 기계적 가공에 의한 패턴부분에 피팅이 발생하여 함몰패턴이 가공될 경우에는 정형마스킹이라고 할 수 있고, 패턴부분에 힐록이 발생하여 돌출패턴이 가공되는 경우에는 부형 마스킹이라고 할 수 있다.

실리콘은 취성재료로서 거시적인 재료시험에서는 주로 탄성변형과 취성파괴의 특성만을 나타내지만 미시적인 차원에서는 소성변형을 경험한다. 즉, 두 고체가 접촉을 할 경우에 하중이 작더라도 표면요철은 높은 압력을 받게 되며 국부적으로 소성변형을 한다.[12] 이때 전위가 그 부위에 생성되며 내부에너지를 상승시킨다. 따라서 전위의 생성을 기계적인 방식으로 적절히 조절할 경우 그 부위에 선택적으로 화학반응을 유도할 수 있는 것이다.

기계가공의 방식에 있어서도 기존의 절삭가공과는 큰 차이점이 있다. 일반적으로 절삭이나 연삭을 행할 때에는 절삭바이트나 연삭숫돌 등을 일정한 절입만큼 강제적으로 밀어 넣음으로써 가공을 하지만 본 연구에서는 공구와 공작물 사이에 일정한 배분력이 작용하도록 한 상태에서 상대운동을 시킴으로써 가공부에 일정한 가공에너지가 전달될 수 있

도록 하였다.

이러한 가공방법은 새로운 기술로서 두 고체가 접촉한 상태에서 서로 상대운동할 때 일어나는 에너지 상호작용의 기초적 현상인 마찰 및 마멸의 개념과 단결정 재질에 대한 전위이론(dislocation theory)을 가공기술에 도입한 것이다.

3. 기계적 가공

3.1 기계가공시 피삭재 내부의 상태

단결정 실리콘은 결정구조면에서 볼 때, 면심입방격자(face centered cubic structure)의 일종인 Diamond Cubic structure이다. 이것은 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 면심입방격자의 내부에 네 개의 원자가 존재하는 것이며, 이때 결정면을 Fig. 2

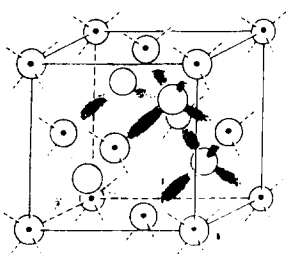


Fig. 1 Diamond cubic structure

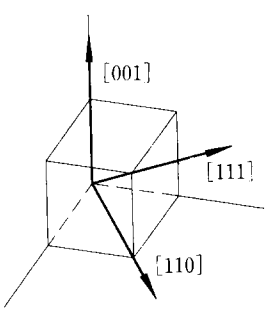


Fig. 2 Crystal planes in cubic structure

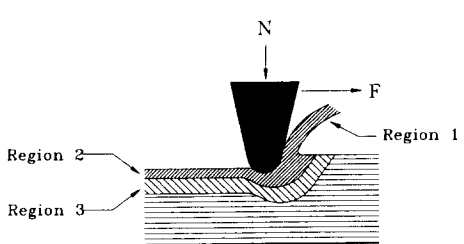


Fig. 3 Surface deformation during mechanical machining N-F

와 같이 정의할 수 있다.

경한 공구로 피삭재를 가공하는 경우와 같이 두 고체 표면 사이에 접촉과 상대적 운동이 일어날 때에 Fig. 3과 같이 세 가지의 서로 다른 영역을 생각해 볼 수 있다. 그림의 영역 1은 직접 칩이 발생하면서 재료가 제거되는 것이고, 영역 2는 가공에 의한 응력에 의해 재료의 결정구조 안에 전위(dislocation)가 발생하면서 기계가공이 끝난 후에 잔류응력이 잔존하게 되는 소성변형층이고, 영역 3은 공구가 직접 접촉하고 있을 때에는 탄성적으로 변형하나 공구가 지나간 후에 탄성회복하여 비가공부와 동일한 상태로 돌아오게 되는 부분으로 이 부분은 2차적인 화학가공에 있어서 화학반응을 유기하는 잔류응력이 존재하지 않는 부분이다. 여기서 영역 1은 수직하중 N이 감소함에 따라 그 크기가 작아지게 되어 어느 하중 이하에서는 나타나지 않으며 재료에는 피층의 영역 2와 그 내부의 영역 3만이 남게 된다. 이것은 기존의 버니싱 가공의 가공상태와 유사한 것으로서 기계적 가공에 의한 재료의 제거는 없다고 볼 수 있다.

칩의 발생에 의한 재료제거가 없는 경우에 피삭재 내부에 발생하는 전위를 Fig. 4에 나타내었다. 전위가 발생하고 있는 면은 피삭재 표면으로부터 54.7°의 각도를 이루는 (111)면으로서 Diamond Cubic structure인 단결정 실리콘의 결정격자에 있어서 원자밀도가 가장 조밀하다.

이밖에도 공구에 의한 기계적 가공시에 주의해야 할 점은 금속과 같은 연성재료는 상당히 큰 배분력이 작용하여도 소성변형만이 발생하지만, 단결정 실리콘과 같은 경취성 재료에 있어서는 접촉부의 평균압력이 일정하다 할지라도 공구의 날끝반경이 크면 (즉, 무디면) 접촉부에는 내부로 전파하는 크

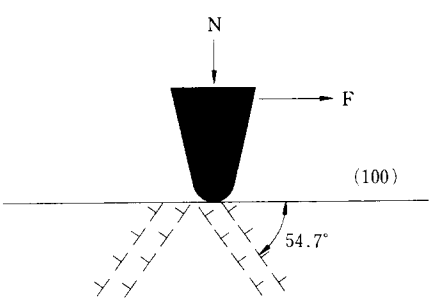


Fig. 4 Dislocation formation during mechanical machining with relatively light load N F (100) 54.7°

랙이 발생하게 된다. 또한 날끝반경이 작은 경우에도 접촉부의 평균압력이 어느 이상 커지게 되면 역시 크랙이 발생한다.[13]

또한, 절삭속도의 변화에 의해서도 가공상태가 달라지게 된다. Boyarskaya[14]에 의하면 단결정 lithium fluoride에 대해 스크래치 실험을 한 결과 속도가 증가함에 따라 접촉부는 소성변형에서 취성파괴로의 천이가 나타났다고 한다. 그러므로 경취성 재료에 대한 기계가공에 있어서 크랙의 발생을 피하기 위해서는 날끝반경이 작은 예리한 공구로, 비교적 작은 배분력을 가하여 느린 속도로 가공해야 함을 알 수 있다.

3.2 기계가공시의 가공폭 예측

기계-화학적 가공에 의한 실제 가공폭의 예측을 위해서는 1차적인 기계가공시에 피삭재 내부에 발생하는 소성변형부의 크기에 대한 예측이 필요하다. 이를 위해서는 Fig. 3이나 Fig. 4에서와 같이 수직하중 N과 접선방향 힘 F가 동시에 작용하면서 공구가 이동하고 있는 상태를 고려해야 하나 본 연구에서는 공구의 이동속도가 충분히 작기 때문에 접촉부는 정적인 압입의 경우와 비슷할 것이라고 가정하였다.

비교적 작은 하중이 가해질 경우에는 공구와 피삭재의 접촉면에 주로 탄성변형이 일어난다고 보아 Hertz에 의한 탄성접촉식을 사용하였고, 큰 하중이 가해질 경우에는 공구에 의한 피삭재 내부로의 압입이 발생하여 소성변형이 발생할 것이므로 기존의 경도시험결과로부터 그 가공폭을 계산하였다.

3.2.1. Hertz 이론에 의한 가공폭의 계산

Fig. 5와 같이 공구의 날끝을 곡률반경 R_1인 구면이라 하고 공작물을 평면으로 가정하면 수직하중 N이 작용할 때, 공구와 공작물의 접촉부에 발생하는 압력분포 p와 접촉원반경 a는 다음과 같은 식으로 계산된다.[15]

$$p=\frac{3N}{2\pi a^2}\left(1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{z^2}{a^2}\right)^{1/2} \tag{1}$$

$$a=\left(\frac{3NR_1}{4E'}\right)^{1/3} \tag{2}$$

여기서, R_1은 공구의 날끝반경이고 E'은 공구재질의 탄성계수 E_1과 공작물 재질의 탄성계수 E_2에 의해 다음과 같이 계산되는 등가탄성계수이다.

$$\frac{1}{E'}=\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \tag{3}$$

따라서 비교적 작은 배분력으로 가공을 할 경우의 가공폭은 식 (2)에서 계산된 접촉원 반경 a에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$w=2\left(\frac{3NR_1}{4E'}\right)^{1/3} \tag{4}$$

3.2.2 비커스 경도시험 결과를 이용한 가공폭의 계산

지금까지 행해진 스크래치 실험결과를 보면 가해진 하중의 제곱근과 스크래치 폭 사이에, 압입형 경도시험에서 나타나는 것과 같은 명확한 비례관계는 없는 것으로 알려져 있으며, 하중의 제곱근이 증가할 때 스크래치 폭은 좀더 작은 비율로 증가한다고 한다.[15] 그러나 본 연구에서 공구에 가하는 하중은 3.2×10^{-3} N~3.2×10^{-1} N 정도의 미소하중이며, 절삭속도도 0.05 mm/sec 이하이므로 가공폭의 대략적인 계산을 위해 하중의 제곱근과 가공폭이 비례한다고 가정하여 비커스 경도시험의 결과값을 그대로 이용하였다

비커스 경도시험에서 사용하는 다이아몬드 인덴터의 형태와 압입에 의해 재료에 나타나는 압흔의 모양은 Fig. 6과 같고, 이때 재료의 비커스 경도는

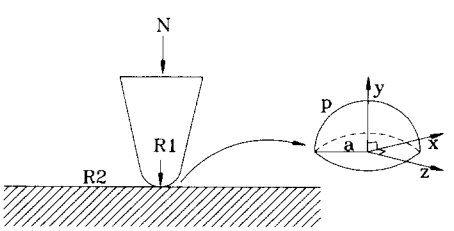


Fig. 5 Hertzian contact of tool and workpiece N

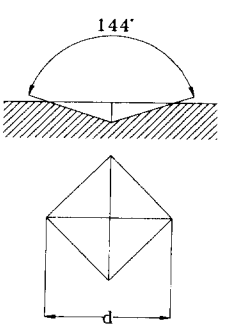


Fig. 6 Indented shape of Vickers hardness tester

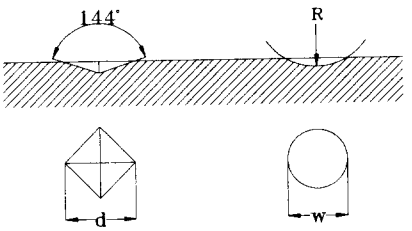


Fig. 7 Indentation of vickers indentor and spherical tip

수직하중 $N(N)$과 압흔의 대각선 길이 $d(\mu m)$에 의해 다음과 같은 식으로 계산된다.[16]

$$HV=\frac{18.2N}{d^2}\ (N/\mu m^2) \tag{5}$$

식 (5)로부터 일정한 비커스 경도에서 하중 N이 변화할 때의 압흔의 기준길이 d를 계산할 수 있으나 본 연구에서 사용한 공구의 형상은 구형이므로 이에 대한 고려가 필요하다.

Fig. 7은 비커스 인덴터와 구형공구가 피삭재에 압입될 때의 상황을 보여주고 있다. 여기서, 두 접촉부의 투영된 면적을 같게 놓음으로써 구형공구가 압입될 때 형성되는 원의 직경 w(결과적으로 스크래치 폭)를 계산하였다. 즉,

$$\frac{1}{2}d^2=\frac{\pi}{4}w^2 \tag{6}$$

$$\therefore\ w=\sqrt{\frac{2}{\pi}}d \tag{7}$$

위식에 $d=\sqrt{\frac{18.2N}{HV}}$을 대입하면 가공폭 w는 다음과 같이 계산된다.

$$w=\sqrt{\frac{2}{\pi}\frac{18.2N}{HV}}\ (\mu m) \tag{8}$$

4. 화학적 가공

실리콘의 습식에칭에 주로 사용되는 에칭액은 여러가지가 있으나 본 연구에서는 특히 이방성에칭특성이 현저한 KOH(수산화칼륨) 용액과 등방성에칭액인 HF(불산) 혼합용액을 사용하였다.

각각의 경우에, 일어나는 화학반응식은 다음과 같다.

KOH 용액을 사용한 경우 :

$$Si+2KOH+H_2O\rightarrow SiO_3^{2-}+2H_2+2K^+ \tag{9}$$

HF 혼합용액을 사용한 경우 :

$$Si+2HNO_3+6HF+4CH_3COOH\rightarrow H_2SiF_6+2H_2O+2HNO_2^{2+}+4CH_3COO^-+H_2 \tag{10}$$

이방성에칭이란 단결정 재질에 대한 에칭에 있어서 결정면별로 에칭속도가 다른 것을 일컫는 말로서 예를 들면 단결정 실리콘을 KOH 용액으로 에칭할 경우 (100)과 (111)면에 대해 에칭속도가 최대 400 : 1의 차이가 발생하고 그 결과 웨이퍼의 결정면에 따라 에칭형상이 달라지게 된다.

교반(stirring)의 방식도 에칭에 큰 영향을 끼치는데, 이는 에칭시에 공작물의 표면에서 발생하여, 에칭을 저해하게 되는 기포와 그밖의 생성물질을 떨어내고 공작물이 계속적으로 신선한 에칭액과 접촉하게 함으로써 같은 에칭액을 사용한 경우라 하더라도 실질적으로 에칭속도를 증가시키는 효과를 나타내며 불규칙적인 기포의 발생으로 인한 표면의 악화를 방지한다.

기계적인 전위결함이 존재하는 단결정 재료를 에칭하게 되면 결함부에 피팅이나 힐록이 발생하게 된다. 여기서, 힐록이라 하는 것은 에칭가공에 의해 한 부분이 다른 부분보다 돌출되어 튀어나오는 현상으로써, 결정격자 결함이 있는 부분이 에칭액과 우선적으로 반응하여 생기게 되는 피팅과는 달리 그 생성원인에 대해서 여러 가지 의견이 있는데 본 연구에서와 같이 기계적인 결함부에 생기는 힐록의 원인으로서는 다음과 같은 것을 고려해 볼 수 있다.

Hirokawa 등[17]은 Cu 이온을 함유한 에칭액을 사용하여 white tin을 에칭함으로써, 힐록이 에칭액에 용해되지 않는 여러 불순물이나 Cu 입자들에 의해 발생하는 것을 확인하였는데, pyramid 형상의 힐록 중심부에서 이러한 입자들을 발견하였다고 한다. Hirokawa 등[18]은 또한 힐록의 발생원인을 다음과 같이 정리하였다. 힐록은 결정표면의 전위결함부에서 마스킹의 작용을 하는 불용성 물질(insoluble impurities)에 의해 발생하며, 이러한 불용성 물질은 결정내부에 존재하는 불순물이 밖으로 빠져나온 것이거나, 또는 에칭액에 존재하고 있던 것이라는 주장이다. Patel 등[19]은 silicon carbide의 carbon face를 NaOH와 KNO_3의 혼합용액으로 에칭함으로써 전위결함부의 에칭방해작용에 의해 힐록이 발생하며, 그 주위표면이 에칭됨과

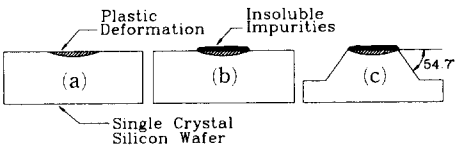


Fig. 8 Formation mechanism of hillock

동시에 전위결함부에서는 오히려 SiC의 침전이 일어났을 수도 있다고 하였다.

결국 이러한 내용을 종합해 보면 기계가공에 의해 표면에너지가 높아진 부분에 용액 속의 불용성 불순물들이 모여들어 표면에 흡착하게 되고, 이 불순물들이 에칭의 진행을 방해하여 힐록이 생성되는 것이라고 결론을 내릴 수 있다. 에칭시에 발생하는 힐록의 생성메카니즘을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)은 기계적가공에 의해 생성된 소성변형부를 나타내며 Fig. 8(b)는 에칭개시와 더불어 불용성불순물이 흡착하는 것이고, 그 결과로 Fig. 8(c)와 같은 돌출패턴이 형성되는 것이다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 실험장치

본 연구에서는 피삭재에 대한 기계적 가공을 위해 Fig. 9와 같은 미세패턴 가공기를 제작하여 사용하였다. 공구부는 고정되어 있고 공작물이 놓여있는 X-Y 테이블을 이송함으로써 공구와 공작물 사이에 상대운동을 발생시키는 방식이며, X-Y 테이블의 이송을 위한 액추에이터로는 두 개의 스텝모터(1.8°/step)와 피치가 1 mm인 이송 스크류를 사용함으로써 1 스텝 당 5 μm의 이송이 가능했다. Fig. 10에서 보듯이 PC에서 나오는 스텝모터 구동

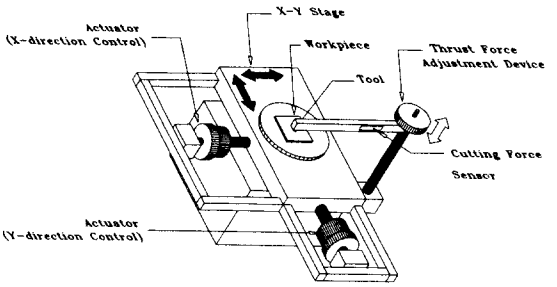


Fig. 9 Micro-patterning machine

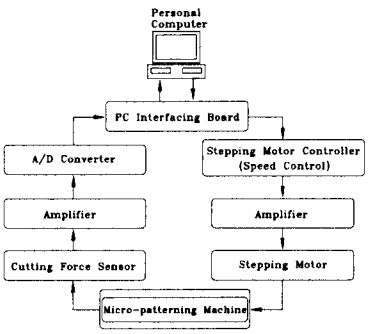


Fig. 10 Schematic diagram of the experimental setup

신호를 amplifier로 증폭하여 두 개의 스텝모터를 동시에 구동함으로써 임의의 패턴을 가공할 수 있도록 하였다. 또한 기계가공시의 절삭력(cutting force)을 측정하기 위해 공구부에 반도체 스트레인게이지를 부착하고 측정된 신호를 amplifier와 A/D converter를 사용하여 PC로 받아들였다.

공구부는 두 가지 종류로 제작되었다. 기계가공시의 접선방향 절삭력을 측정하기 위한 공구부는 일정한 배분력이 가해진 공구가 절삭방향으로 미소이동을 하면서 스트레인게이지를 부착한 판에 변형

Table 1 Mechanical properties of the tool and workpiece

		Specification	Elastic modulus (N/m^2)	Poisson's ratio	Hardness HV (kg/mm^2)
Tool	Diamond	[Sphere] Tip radius : 10 μm	10.35×10^{11}	0.07	8000
Workpiece	Single Crystal Silicon	[Wafer] Crystal orientation : (100) Diameter : 100 mm Thickness : 0.5 mm	1.9×10^{11}	0.09	800

을 주도록 되어 있으며 미세패턴의 가공을 위한 공구부는 마이크로미터를 이용하여 일정한 배분력을 가하고 특히 미세패턴 가공시에 문제가 되는 절삭방향의 공구부 처짐을 최소화하도록 제작되었다. 실험에 사용된 공구와 피삭재의 형상과 기계적성질은 Table 1과 같다.

화학적 에칭가공시에 사용한 에칭세트는 Fig. 11에 개략적으로 나타냈다. 에칭액이 들어있는 비이커를 일정한 온도로 조절되고 있는 수조(water tank)안에 위치시킴으로써 일정온도를 유지하였다. 에칭시에 공작물이 신선한 에칭액과 지속적으로 접촉하도록 하기 위하여 에칭액을 저어주거나, 초음파 세척기를 사용하여 교반을 하였다.

본 실험에 사용된 장비들은 Table 2와 같다.

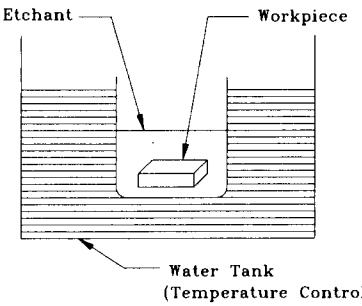


Fig. 11 Schematic view of the etching set

5.2 실험방법

(1) 절삭력은 2차적인 화학가공에 영향을 주는 중요한 가공변수이며 정밀패턴 가공시의 공구부의

Table 2 Experimental apparatus

Apparatus	Specification	Manufacture & Type
Micro-patterning machine	2 Axes	Custom built
Stepping motor amplifier	2 Channel	Custom built
PC interfacing bord		Custom built
Strain amplifer		Measurement group 2310
Data acqusition board	A/D : 8 Channel D/A : 1 Channel	PCL711S
Surface profilometer	Resolution : 5 nm	Mitutoyo SV-600
Micro hardness tester	Normal force : 10 gf~1000 gf	Buehler Micro 2003
Metallurgical Microscope	Magnification : ×50~×1000	Union Optical Co., LTD. Versamet-3
EDX analyzer		KEVEX
SEM Microscope		Hitachi S2700
Microbalance	Resolution : 10^{-5} g	Sartorius research R220D
PC	80386 Microprocessor Based personal Computer	
Etching set		Custom built
Ultrasonic cleaning Device		Fisher scientific FS5

처짐을 야기시키는 요인이기도 하다. 따라서 반도체 스트레인게이지를 부착한 공구부를 사용하여 기계가공시의 절삭력을 측정한다. 공구의 재질과 형상, 배분력, 그리고 절삭속도를 변화시키면서 측정을 한다.

(2) 다이아몬드공구를 사용하여 배분력을 변화시키면서 피삭재에 기계적 가공을 하고 공구와 피삭재의 접촉에 의한 가공부의 폭을 관찰한다. 배분력이 작을 경우에는 폭의 관찰이 어려우므로 KOH 용액으로 짧은 시간 에칭을 한 후에 관찰한다. 관찰된 폭을 Vickers와 Hertz식으로부터 유도한 이론치와 비교한다.

(3) 피삭재에 대해 기계적 가공과 함께 여러 가지 조건으로 에칭실험을 함으로써 미세요철패턴의 가공을 위한 최적의 조건을 도출한다.

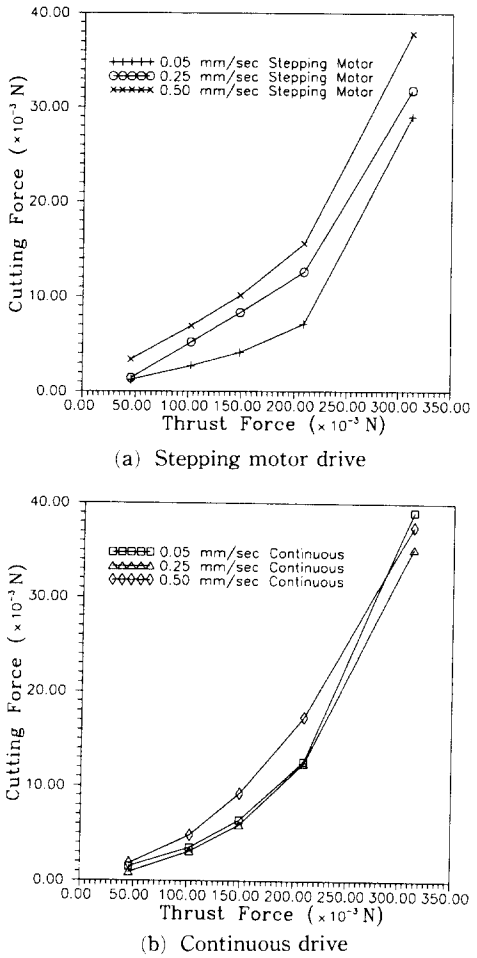
(4) 앞의 실험에서 결정된 기계적 가공조건과 화학적 가공조건에 의해 미세패턴의 가공을 한다. 미세패턴가공기의 X-Y 테이블을 작성된 program에 의해 구동함으로써 기계적 가공을 하고 에칭하여 미세요철패턴을 가공한다.

5.3 실험결과

5.3.1 기계가공시의 절삭력 측정

날끝반경 10 μm인 다이아몬드공구에 일정한 배분력을 가한 상태에서 기계가공시의 절삭력을 측정해 보았다. 먼저 (100)결정면 단결정 실리콘웨이퍼의 [100]방향에 대해 배분력을 45.6×10^{-3} N에서 312.2×10^{-3} N까지 5가지로 변화시키고, 절삭속도를 0.05 mm/sec, 0.25 mm/sec, 0.50 mm/sec의 3가지로 변화시키면서 측정하였다. 액추에이터로서 스텝모터를 사용한 미세패턴가공기의 X-Y 테이블이 단속적인 이송과 함께 미세한 진동을 나타냈기 때문에, 연속적인 구동시의 절삭력과 비교해 보기 위하여 같은 배분력과 절삭속도에서 연속적인 구동방법으로 가공한 경우의 절삭력의 측정도 병행하였다. 3회 동일한 측정을 실시하여 그 평균값으로 결과를 나타내었다.

Fig. 12는 절삭력과 배분력의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 45.6×10^{-3}~312.2×10^{-3} N의 배분력 범위에서 대략 1×10^{-3}~30×10^{-3} N 정도의 비교적 작은 절삭력을 나타냈으며 절삭력이 배분력의 증가에 비해 보다 빠른 비율로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 가해진 수직하중과 비례관계를 나타내는 마찰력과는 달리 공구와 피삭재 두 고체간에 단순한 면마찰뿐만이 아닌 공구의 피삭재에 대한 압입과 그로 인한 피삭재 내부에 적지않은 변형이 발생하는 것을 의미한다.



(a) Stepping motor drive

(b) Continuous drive

Fig. 12 Cutting force vs. thrust force at different cutting speeds

절삭속도에 의한 영향은 속도가 0.05 mm/sec에서 0.50 mm/sec로 10배 증가하여도 큰 차이가 없었고 스텝모터 구동에 의한 단속이송의 경우에는 (Fig. 12(a)) 스텝모터의 특징적인 진동 때문에 연속적인 구동과는 조금 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

(100)웨이퍼의 [110]방향과 (111)웨이퍼의 각 방향으로도 절삭력을 측정해 보았으나 가공면이나 가공방향에 따른 절삭력의 뚜렷한 차이는 확인할 수 없었다.

공구로서 직경 2.28 mm의 강구(steel ball)와 직경 2.5 mm의 구형 사파이어를 사용한 경우에는 $45.6\times10^{-3}\sim312.2\times10^{-3}$ N의 배분력 범위에서 대략 0.18~0.23의 일정한 절삭분력비를 나타냈다. 공구가 다이아몬드에 비해 경하지 않으며 날끝반경이 커서 피삭재 내부로의 현저한 압입없이 마찰이 발생했기 때문으로 생각된다.

5.3.2 기계가공에 의한 가공폭과 가공상태

다이아몬드 공구를 사용하여 $3.2\times10^{-3}\sim312.2\times10^{-3}$ N의 8가지 배분력으로 기계적인 가공을 한 후에 가공부의 형상을 금속현미경으로 관찰하였다. 1000배의 배율로 Nomarski 모드에서 관찰을 하여도 수직하중 3.2×10^{-3} N의 경우에는 현저한 흔적이 관찰되지 않았다. 이것은 피삭재에 칩이 발생하지 않고 공구와 피삭재 접촉부에서의 마찰에 의해 버니싱가공과 같은 가공이 되어 피층에 소성변형층이 생성된 것으로 보이며 이때의 소성변형부의 크기(홈의 폭)를 관찰하기 위해 모든 시편을 50 의 중량비 10% KOH 용액으로 1분 30초 동안 에칭하고 나서 Nomarski 모드 금속현미경으로 관찰하였다. 측정값은 동일한 조건에서 5회이상 측정하여 평균한 결과이다.

Fig. 13에 Hertz식으로 계산한 홈의 폭과 (식 (4)), Vickers 경도시험 결과를 이용하여 계산한 홈의 폭 (식 (8)), 그리고 실제 실험으로부터 관찰한 결과를 함께 나타내었다. 그림에서 보면 비교적 작은 수직하중에서는 Hertz식도 비슷한 결과를 나타내나 하중이 증가하여 공구가 피삭재 내부로 압입하게 되는 하중에 이르면 Hertz식에 의해 계산된 값은 실제 관찰되는 홈의 폭과 크게 다르게 된다. 이러한 경우에 있어서도 Vickers 경도시험 결과를 이용한 경우의 계산치는 비교적 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

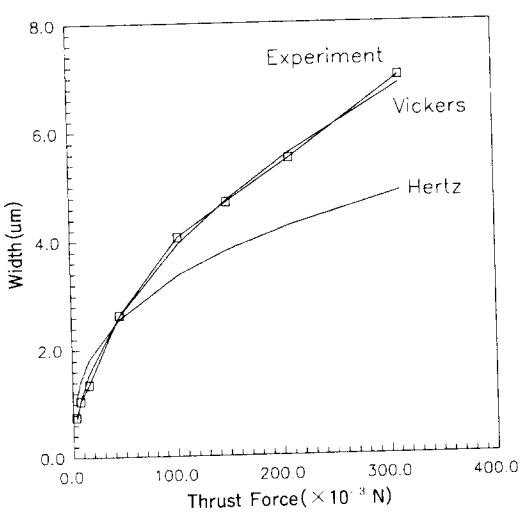
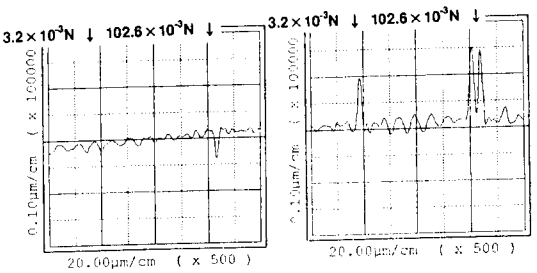


Fig. 13 Width of the machined pattern vs. thrust force

5.3.3 기계적 가공과 화학적 가공을 조합한 미세가공기술

여러가지 조건으로 기계적 가공과 화학적인 에칭가공을 함으로써 기계-화학적 가공기술에 있어서의 가공조건의 변화에 따른 가공상태의 변화를 알아보았다.

Fig. 14(a)는 직경 20 μm의 다이아몬드공구를 사용, 3.2×10^{-3} N과 102.6×10^{-3} N의 두 가지 배분력으로 기계적 가공을 한 후에 측정한 surface profile이고 Fig. 14(b)는 그 시편을 다시 10%, 50℃의 KOH용액으로 1분 30초간 에칭한 후의 surface profile 측정 결과이다. 에칭 전에는 102.6×10^{-3} N으로 가공한 부분만 아주 미소한 흔



(a) Before etching (b) After etching

Fig. 14 Surface profile of the scratched tracks (Tool: dia. 20 μm diamond tip)

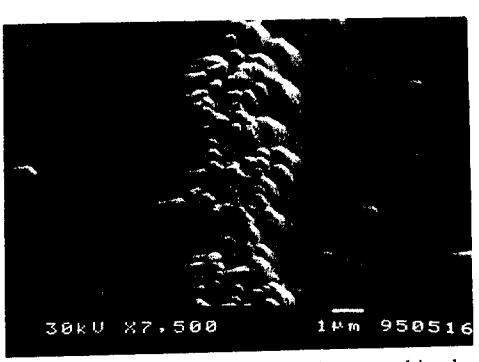


Fig. 15 SEM micrograph of the micro-machined pattern

적이 보이나 이를 에칭한 후에는 3.2×10^{-3} N과 102.6×10^{-3} N으로 가공한 부분 모두에 힐록(Hillock)이 성장하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 15는 다이아몬드공구로 약 102.6×10^{-3} N의 하중을 주어 기계적 가공을 한 후에 10%, 50℃의 KOH 용액을 사용, 교반을 하면서 12분간 에칭한 시편의 SEM 사진이고 Fig. 16은 시편의 surface profile이다. 기계가공에 의한 패턴을 따라서 상당한 높이의 힐록이 성장하여 돌출패턴이 형성되었다.

Fig. 16의 profile은 촉침의 반경이 5μm인 접촉식 surface profilometer를 사용하였기 때문에 실제의 단면형상과는 조금 차이가 있었는데, 광학현미경이나 SEM의 관찰결과를 토대로 할 때 돌출패턴의 대체적인 단면형상은 Fig. 17과 같았다. (100)면의 단결정 실리콘에 대한 이방성 에칭의 결과로 그림과 같이 54.7°의 경사면을 지니는 사다리꼴 단면의 패턴이 가공된 것을 알 수 있으며 그림에서 패턴의 윗폭에 해당하는 w는 5.3.2절에서 측정한 바 있는 기계가공시의 공구와 실리콘웨이퍼의 접촉에 의한 가공부의 폭과 거의 일치하였다. 또한 패턴의 높이 t는 10%, 50℃의 KOH를 사용하여 12분간 에칭한 시편의 경우 약 1.7 m였는데 이 값은 앞에서 측정한 에칭속도와 비교할 때 같거나 조금 큰 값으로서, 기계가공부가 마스킹되어 그 주변이 제거가공되는 효과 이외에도 기계가공부에 대한 침전(deposition)이 일부 발생한 것으로 추정된다.

Fig. 18은 102.6×10^{-3} N으로 가공한 시편을 35%, 50℃의 KOH 용액을 사용하여 10분간 에칭한 시편을 촬영한 것이고 Fig. 19는 패턴 한 개의 surface profile이다. 10%, 50℃의 용액을 사용한 경우와는 달리 피팅에 의한 얕은 홈이 가공되었으

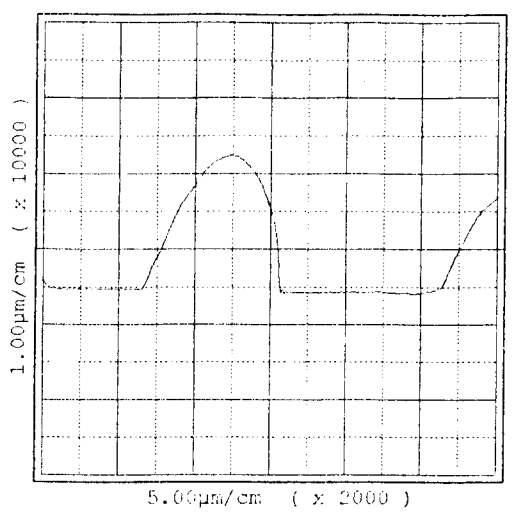


Fig. 16 Surface profile of the micro-machined pattern

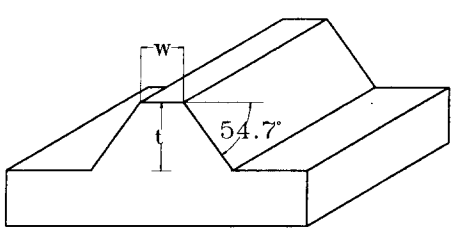


Fig. 17 Idealized cross-sectional view of the micro-machined pattern

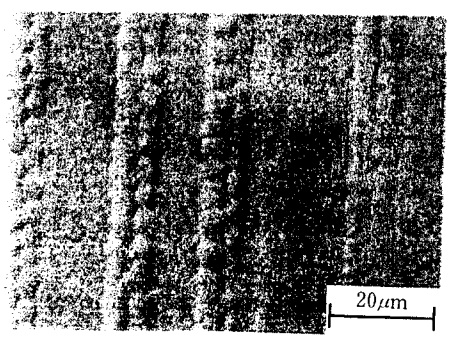


Fig. 18 Pattern machined with 35%, 50℃ KOH solution

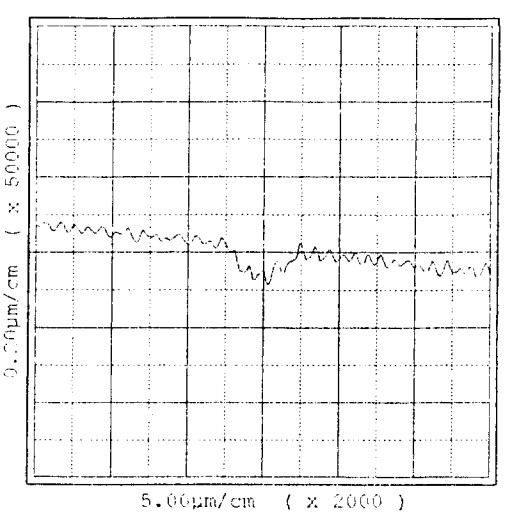


Fig. 19 Surface profile of the pattern machined with 35%, 50℃ KOH solution

며, 에칭액의 농도와 온도가 변할 때 단순히 에칭 속도가 달라지는 효과 이외에도 에칭상태 자체가 달라질 수도 있다는 사실을 나타낸다.

등방성 에칭액을 사용한 경우의 가공상태를 알아보기 위해 HF, HNO_3, CH_3COOH를 각각 부피비 1 : 3 : 8로 혼합한 용액을 사용하여, 기계적으로 가공한 시편에 대한 에칭가공을 해 보았다. HF혼합용액은 단결정 실리콘에 대해서 등방성 에칭액이므로 KOH용액의 경우와 같은 피라미드모양의 힐록은 관찰할 수 없었고 단지 비교적 짧은 시간 에칭을 함으로써 흠이 진 패턴을 가공할 수 있었다. Fig. 20은 102.6×10^{-3} N으로 기계가공하고 HF 혼합용액을 사용하여 상온에서 1분간 에칭한 경우에 가공된 패턴의 surface profile이다. 입구폭 약 6 μm, 깊이 약 0.2 μm인 함몰패턴이 가공되었다.

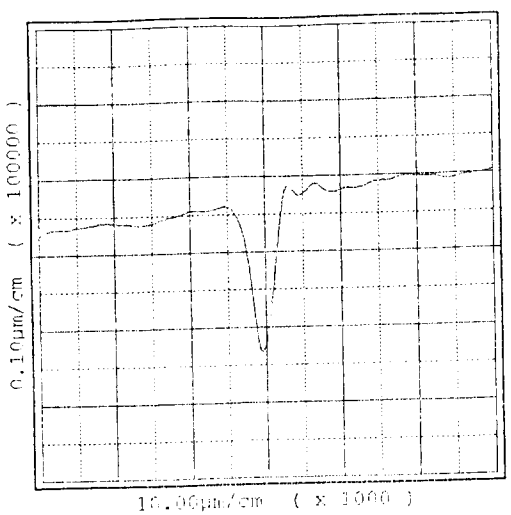


Fig. 20 Surface profile of the pattern machined using HF etchant

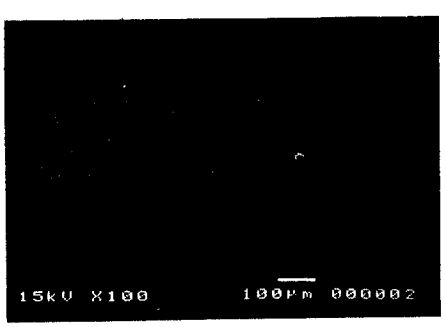


Fig. 21 SEM micrograph of the micro-machined pattern

본 가공법을 이용한 미세패턴가공의 가능성을 알아보기 위해 미세패턴가공기로 임의의 패턴을 가공하고 KOH용액으로 에칭함으로써 패턴을 따라 발생하는 힐록과 피팅을 이용하여 미세요철패턴을 가공하였다. (Fig. 21)

5.4 고찰

본 가공법에 대해 다음과 같은 사항을 더 고려해 볼 수 있다.

(1) 본 연구에서는 (100)결정면의 웨이퍼만을 사용하여 실험을 했으나 이방성 에칭액의 경우에 웨이퍼의 결정면에 따라 특징적인 에칭상태를 나타내므로 다른 웨이퍼에 대한 실험을 생각해 볼 수 있다. 예를 들어 (110)면의 웨이퍼를 사용하게 되면 가공면에 대해 수직방향으로 에칭이 진행하므로 큰 종횡비(aspect ratio)를 지닌 요철패턴의 가공이 가능할 것으로 생각된다.

(2) 본 연구에서는 공구로서 날끝반경 10 μm인 다이아몬드를 사용하였으나 현재 수 나노미터의 날끝반경을 지닌 다이아몬드 팁의 가공이 가능한 현실에 비추어 볼 때, 미세패턴의 가공을 위한 가공기의 설계, 제작에 근래에 활발히 연구되고 있는 압전형작동기(piezo actuator)와 함께 보다 예리한 공구를 사용함으로써 미세하고 정밀한 패턴의 가공이 가능할 것이다.

6. 결 론

기계적 가공과 화학적 가공방법을 조합한 새로운 개념의 마이크로 가공기술을 제안하고 이를 단결정 실리콘웨이퍼에 대한 미세 요철패턴의 가공에 적용함으로써 다음의 결과를 얻었다.

(1) 날끝반경이 10 μm인 다이아몬드 팁으로 일정한 배분력(3.2×10^{-3} N-102.6×10^{-3} N)을 가하면서 기계적가공을 하고 이를 다시 에칭가공함으로써 폭과 깊이 각각 수 μm인 미세요철패턴의 가공을 행하였다.

(2) 공구의 형상과 가해지는 배분력, 그리고 에칭조건 등을 변화시킴으로써 가공되는 요철패턴의 단면형상의 제어가 가능하였다.

(3) 가공을 위한 비용이 적게 소요되며, 다품종 소량생산에 적합하다는 점에서 미세기계요소의 가공에 널리 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: ME94-A-31)의 지원에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Kurt E. Petersen, 1982, "Silicon as a Mechanical Material," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 70, No. 5, pp. 420~457.

(2) Inamura, T., Takezawa, N., Kumaki, Y. and Sata, T., 1994, "On a Possible Mechanism of Shear Deformation in Nanoscale Cutting," *Annals of CIRP*, Vol. 43, No. 1, pp. 47~50.

(3) Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H. and Ohmori, G., 1991, "An Atomistic Analysis of Nanometric Chip Removal as Affected by Tool-Work Interaction in Diamond Turning," *Annals of CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 551~554.

(4) Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H. and Uchikoshi, J., 1994, "Structure of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis," *Annals of CIRP*, Vol. 43, No. 1, pp. 51~54.

(5) Berns, H., Fischer, A. and Kleff, J., 1993, "Scratch Tests on Iron-, Nickel-, Cobalt-Based Alloys at Elevated Temperatures," *Wear*, Vol. 162, pp. 585~589.

(6) Thomas A. Adler and Richard P. Walters, 1993, "Wear and Scratch Hardness of 304 Stainless Steel Investigated with a Single Scratch Test," *Wear*, Vol. 162, pp. 713~720.

(7) Ikawa, N., Donaldson, R. R., Komanduri, R., König, W., McKeown, P. A., Moriwaki, T. and Stowers, I. F., 1991, "Ultraprecision Metal Cutting - the Past, the Present and the Future," *Annals of CIRP*, Vol. 40, No. 2, pp. 587~594.

(8) Tang, W. C., Nguyen, T. H. and Howe, R. T., 1989, "Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures," *Sensors and Actuators*, Vol. 20, No. 1 & 2, pp. 25~32.

(9) Tai, Y. C., Fan, L. S. and Muller, R. S., 1989, "IC-Processed Micro-Motors : Design, Technology, and Testing," *Proc. IEEE Micro Electromechanical Systems Workshop*, Salt Lake City, UT, U. S. A. , pp. 1~6.

(10) Sander, C. S., Knutti, J. W. and Meindl, J. D., 1980, "A Monolithic Capacitive Pressure Sensor with Pulse-period Output," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-27, p. 927.

(11) Sangwal, K., 1987, *Etching of Crystals*, Elsevier Science Publishers B. V. .

(12) Kim, D. E. and Suh, N. P., 1991, "On Microscopic Mechanisms of Friction and Wear," Wear, Vol. 149, pp. 199~208.

(13) 谷口紀男, 1974, 材料と加工, 共立出版.

(14) Boyarskaya, Yu. S., 1972, "Deformation of Crystals in Microhardness Tests," *Izd. ShTINTsA*, Kishnev.

(15) Johnson, K. L., 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge Univ. Press.

(16) Szymanski, A., Szymanski, J. M., 1989, *Hardness Estimation of Minerals*, Rocks and Ceramic Materials, PWN publishing.

(17) Hirokawa, T., Honda, K. and Shibuya, T., 1974, "Formation of Etch Hillocks in White Tin," *Journal of Crystal Growth*, 24/25, pp. 484~487.

(18) Honda, K. and Hirokawa, T., 1972, "Dislocation Etch Hillock Formation in White Tin Single Crystals," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 11, No. 12, December, pp. 1763-1774.

(19) Patel, A. R. and Mathai, K. J., 1972, "Etch Hillocks on Carbon Faces of SiC," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 5, pp. 390~393.