

# 마스크리스 나노 패턴제작을 위한 나노스크래치 된 Si (100) 표면의 식각 마스크 효과에 관한 연구

윤성원<sup>#</sup>, 강충길<sup>\*</sup>

## Study on the Masking Effect of the Nanoscratched Si (100) Surface and Its Application to the Maskless Nano Pattern Fabrication

Sung-Won Youn<sup>#</sup> and Chung-Gil Kang<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

Masking effect of the nanoscratched silicon (100) surface was studied and applied to a maskless nanofabrication technique. First, the surface of the silicon (100) was machined by ductile-regime nanomachining process using the scratch option of the Nanoindenter ® XP. To clarify the possibility of the nanoscratched silicon surfaces for the application to wet etching mask, the etching characteristic with a KOH solution was evaluated at room temperature. After the etching process, the convex nanostructures were made due to the masking effect of the mechanically affected layer. Moreover, the height and the width of convex structures were controlled with varying normal loads during nanoscratch.

**Key Words:** Nanoscratch(나노스크래치), Masking Effect (식각 마스크 효과), Mechanically affected layer (가공변질층) Anisotropic etching (이방성 식각)

### 1. 서론

크로마토그래피칩, 랩온어칩, 시스템온칩, 저장매체, 광학렌즈, 필터등과 같은 MEMS/NEMS 부품의 발달과 함께 IT/NT/BT 분야에서 초미세 유로 및 패턴의 필요성이 증대되고 있다. 현재 상업적으로 가장 널리 사용되는 광 리소그래피 기술의 경우 빛의 회절한계에 의하여 100nm 이하의 가공이 어렵고, 공정특성상 다단계의 마스크 공정을 필요로 하며, 패턴 변경 등 디자인 변화를 위해서는 새로 마스크를 제작해야 하는 문제가 있다. 고

정밀도의 광리소그래피 공정을 위해서는 크롬 (1 in<sup>2</sup> 당 5 μm 이상의 형상은 200 달러, 1~5 μm의 형상은 500 달러) 및 백금도금마스크와 같은 경질마스크가 이용 된다. 마스크를 만드는데 필요한 시간과 비용은 광 리소그래피 뿐만 아니라 소프트 리소그래피를 포함한 많은 MEMS/NEMS 분야에서 초미세 제작기술이 응용되는 데 있어 걸림돌이 되고 있다<sup>1</sup>.

반도체 공정을 대체할 수 있는 마스크리스 나노가공 기술의 한 예로 나노프로브 기반 리소그래피 기술을 들 수 있다. 초미세 프로브 기반 나노

접수일: 2003년 8월 18일; 게재승인일: 2004년 2월 20일  
# 교신저자: 부산대 텍소/레오성형연구소(NRL), 정밀기계공학과  
E-mail: yswonny@pusan.ac.kr, Tel. (051)510-1455  
\* 부산대 기계공학부 (ERC/NSDM)

가공 기술이 유용하게 사용되는 이유<sup>2</sup>는 10nm 이하 정밀도의 구조체의 제작이 가능하고, 공정이 간단하며 설계변경이 용이하고, 초기장비설치 및 장비가동에 드는 비용이 매우 저렴하기 때문이다. 또한, 인가전류 및 수직하중의 조절에 의하여 구조체의 높이 및 치수를 변화시킬 수 있기 때문에 3 차원 가공이 가능하며 마스크가 필요 없다는 장점이 있다.

나노프로브 기반 리소그래피 기술의 예로는 나노양극산화기술 (nano-oxidation)<sup>2, 3</sup> 과 정적/동적 나노스크래치 (dynamic plowing)<sup>2, 4</sup> 기술 등을 들 수 있다. 또한, 최근에는 나노스크래치에 의하여 시편 표면에 형성된 산화수산화물 용기층이나 가공변질층을 이용한 마스크리스 나노가공기술도 소개된 바가 있다<sup>5-6</sup>. 단결정 실리콘을 다이아몬드 팁을 이용하여 가공하는 경우 가공표면에는 크게 두 가지 형태의 결정 및 화학적 변화가 발생한다. 그 중 하나는 가공 팁과 표면의 마찰에 의한 실리콘 결합의 파괴에 의하여 발생하는 수산화물/산화물 용기층의 생성이다<sup>7-9</sup>. 또, 한가지는, 스크래치 된 표면에 비정질 산화층과 전위밀집층으로 구성된 가공변질층이 형성된다는 것이다<sup>11-13</sup>.

본 연구는 나노인텐터의 일정하중스크래치 (constant load scratch, 이하 CLS 로 표기) 와 습식식각 기술을 병용한 대면적 극미세 패턴의 마스크리스 제작기술의 개발을 위한 연구의 일환으로, 나노스크래치 된 실리콘 표면의 식각 마스크효과에 대한 연구를 수행하였다. 소재표면에 가공변질층을 형성시키기 위하여 CLS 를 이용한 연성영역 나노 패턴 가공을 수행 하였으며, KOH 용액에서의 식각실험을 통해 가공변질층의 식각마스크 효과를 조사하였다. 또한, 스크래치 실험 시 소재표면에 부하되는 수직하중의 조절에 의하여 식각 후 구조체 형상을 제어하였다.

## 2. 가공방법 및 장치

패턴 가공 실험을 위하여 미국 MTS (Material Testing System)사에서 제작된 나노인텐터® XP 의 일정하중스크래치(CLS)옵션이 사용되었다. 가공 팁으로는 팁 끝 반경이 > 40 nm 로 알려진 다이아몬드 Berkovich 팁이 사용되었다. 시편 표면의 관찰에는 PSIA 에서 제작된 AFM 장비인 XE-100 이 사용되었다.

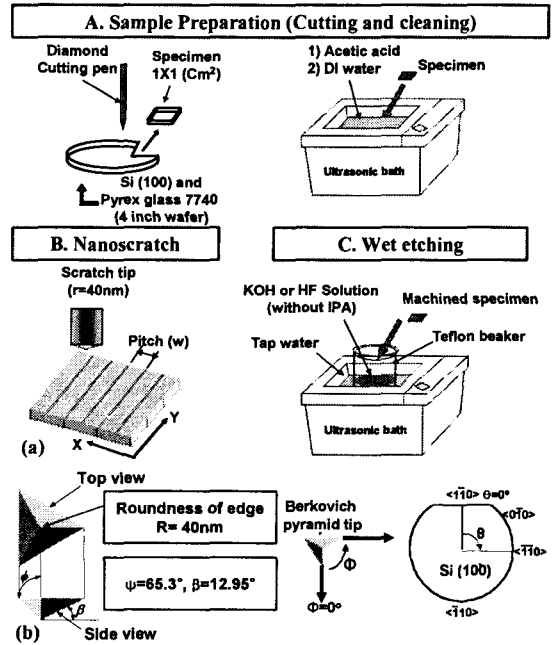


Fig. 1 Schematic diagram of (a) experimental procedure and (b) Geometry of scratch tip and meaning of symbol  $\Phi$  and  $\theta$

Table 1 Ductile mode nanomachining conditions

Tip type	Normal load ( $L_n$ )	Scratch rate ( $S_s$ )	$\Phi$	Post profile load ( $L_p$ )
Diamond	5 mN	10 $\mu\text{m/s}$	$0^\circ$	0.1 $\mu\text{N}$
Berkovich				

Fig. 1 (a)는 실험의 개략 도를 나타내고 있으며 CLS 실험은 정상적인 대기 환경하 (온도: 20-21 $^\circ\text{C}$ , 상대습도: 45-50 %)에서 이루어 졌다. 시편의 세척 및 식각 공정을 위해서 초음파 세척기가 사용되었으며, 가열은 시키지 않았다. Berkovich 팁의 형상 및 치수와, 기호  $\Phi$  의 의미는 Fig. 1 (b) 에 나타나 있다. 팁의 방향을  $\Phi = 0^\circ$ 로 고정시킨 이유는 소성 변형을 잘 발생시키고 소재의 over coat 현상을 최소화 하기 위해서이다. 스크래치 후에 수행되는 포스트 프로파일은 스크래치 된 표면을 매우 낮은 하중으로 다시 스크래치 함으로써 탄성회복 후 소재의 최종 잔류 깊이를 측정하는 역할을 한다. 따라서, 포스트 프로파일에 의한 표면의 재 변형을

방지하기 위하여 기본 설정 값인 100  $\mu\text{N}$  (default value)보다 훨씬 낮게 설정하였다.

### 2.1 단결정 실리콘

단결정 실리콘으로는 0.5 mm 두께의 n-type 실리콘 (100) 웨이퍼가 사용되었다. 절단된 Si (100) 샘플은 초음파세척기를 이용하여 아세톤과 DI 액에서 세척되었다. 인위적으로 생성되는 H-passivation 층<sup>4</sup>의 영향을 배제하기 위하여 HF 용액에 의한 자연산화막 제거는 하지 않았다. 세척 후 AFM 으로 측정된 시편표면의 표면조도는 약  $R_a = 2-5 \text{ nm}$  였다. 단결정 실리콘의 경우 결정면에 따라 인장강도 및 슬립발생의 용이함에 있어서 차이가 있다<sup>10</sup>. 이러한 결정방위에 따른 가공특성의 차이의 영향을 배제하기 위하여, 스크래치 방향은 약한 결합으로 인해 실리콘의 고정밀 가공에서 흔히 사용되는 [100] 방향으로 고정하였다. 그루브 패턴 가공을 위하여 수직하중 및 패턴의 피치변화에 따른 CLS 실험을 수행하였으며, 별도의 언급이 없는 경우 가공 실험 조건은 Table. 1 과 같다. CLS 가공 된 시편은 20 wt.% KOH 용액에서 15 분간 식각 시켰다.

## 3. 결과 및 토론

### 3.1 단결정 실리콘의 연성-영역 가공

가공변질층을 식각 마스크로 이용하여 고정밀도의 극미세패턴을 제작하기 위해서는, 우선 소재 표면에 원하는 형상 및 치수의 가공변질층을 균일하게 형성시키는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 소재 표면에 가공된 그루브 패턴이 화학적 식각공정에서 음성/양성레지스트 역할을 하기 때문이다.

실리콘, 세라믹, 유리와 같은 경취성 재료의 변형거동은 크게 연성모드와 취성모드로 구분되며, 경취성 재료의 고정밀도 가공에는 연성영역 가공이 적합하다는 것은 이미 잘 알려져 있다<sup>10-12</sup>. 가

공하중이 임계하중 (critical load)보다 낮을 때에는 탄소성 변형이 주 변형모드인 연성-영역 변형을 나타내지만, 임계하중 이상에서는 취성파괴에 의한 크랙이나 파단이 발생한다. 단결정 실리콘의 연성-취성 천이가 발생하는 임계하중 (critical load)은 약 40-50 mN 으로 보고된 바 있다<sup>13</sup>. 본 연구에서 패턴제작을 위하여 설정된 스크래치 수직하중은 최대 5 mN 였으므로 연성-영역 가공이 성립함을 예측할 수 있다.

참고로, 증가하중스크래치 (ramp load scratch, 이하 RSL 로 표기) 실험 후의 실리콘 표면의 광학현미경 사진을 Fig. 2 에 나타내었다. 수직하중은 0.1 mN 에서 100 mN 으로 증가되었으며, 그 외의 실험 조건은 Table. 1 과 같았다. 관찰을 위하여 스크래치를 세 부분으로 나누어 1000 배 배율 현미경으로 관찰하였다. 나노인텐터에서 임계하중의 측정은 마찰력 곡선 또는 마찰계수의 기복으로 결정된다. 본 연구의 RLS 실험에서 측정된 임계하중 (critical load)은 참고문헌에 비해 다소 높은 값인 62 mN 였다. 임계하중을 정확하게 측정하기 위해서는 전기저항/표면저항 및 고음향 탐지기술을 병용해야 할 것으로 판단된다.

단결정 실리콘의 연성영역 나노 가공에서 발생하는 소재의 변형거동을 정량적으로 이해하기 위하여 Table 1 의 실험조건으로 CLS 실험을 실시하였다. Fig. 3 은 CLS 에 의해 가공된 실리콘 (100)면의 AFM 사진 및 수직/수평단면을 나타내고 있다. CLS 실험조건은 Table 1 과 같으며, AFM 표면 관찰을 하기 전에 증류수를 이용한 초음파 세척을 실시하였다. Fig. 3 (b)의 수직단면에서 알 수 있듯이 소재의 소성변형에 의한 파일-업 외에 중앙부에 약 14 nm 높이의 용기 (surface protuberance)를 관찰할 수 있다. 스크래치 방향에 평행하게 발생하는 파일-업의 좌우측양이 다른 것은 나노인텐터에 스크래치 팁을 장착할 때 발생하는 편심 때문이다.

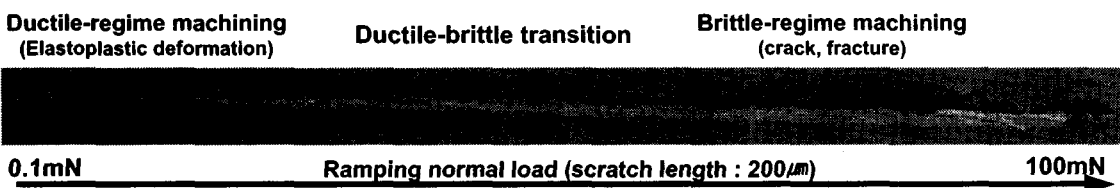


Fig. 2 Micrograph (1000X) of the Si (100) surface after ramping load scratch

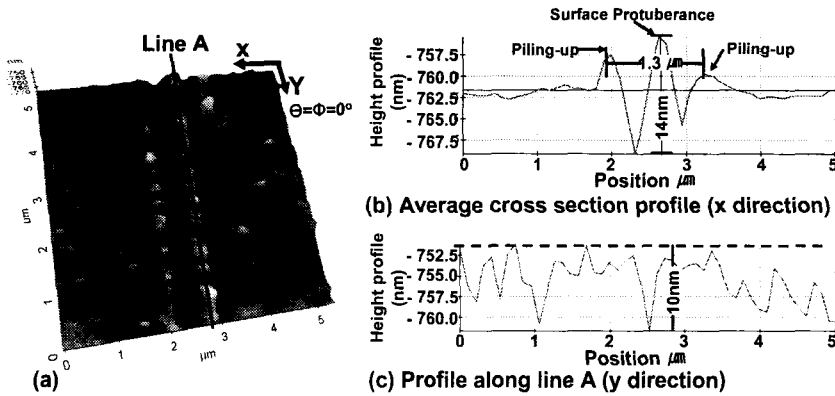


Fig. 3 AFM image and cross section profile of single crystal silicon after ductile regime nanomachining by CLS

단결정 실리콘 표면과 가공 팁의 마찰에 의해 발생하는 용기 현상의 발생메커니즘은 보고된 바가 있으며 다음과 같다<sup>5,6</sup>. 실리콘 표면을 다이아몬드 팁으로 마찰시키면, 팁-표면 접촉부(마찰부)의 후방에는 인장 및 전단 응력이 작용하여 실리콘 결합의 국부적인 파괴가 발생하며, 결합이 파괴된 실리콘이 대기 중에 존재하는 산소, 수소와 반응하여 산화물 및 수산화물을 형성한다. 반면에, 팁-표면 접촉부의 전방에는 압축간류응력이 작용하여 산소가 주입되기 어려워져서 반응량이 감소한다. 또한, 시편에 부하되는 수직하중이 증가하면 실리콘 결합을 파괴시키는 인장 및 전단응력이 증가하므로, 생성되는 산화/수산화물의 양도 증가된다. Fig. 3 (c)은 스크래치 방향에 평행하게 분석한 용기부의 표면을 나타내고 있다. CLS 실험 시 수직하중이 5 mN 으로 일정하게 유지되었기 때문에 용기부의 높이 변화는 크지 않았으며, 측정된 최대변화값은 10 nm 였다.

### 3.2 나노스크래치된 Si (100)표면의 식각 마스크 효과

단결정 실리콘표면을 다이아몬드 팁으로 가공을 하면 팁과 소재 표면의 마찰에 의한 기계화학적 반응뿐만 아니라, 하중 부하에 의하여 스크래치된 표면 밑에는 결정 및 화학적 변화도 발생한다.

Morita 의 TEM, Rutherford back sputtering, Auger electron spectroscopy, Laser roman spectroscopy 분석 결과<sup>8,9</sup>에 따르면, 다이아몬드 팁에 의하여 가공된 실리콘 표면에는 결정성이 낮은 산화층과 전위

밀도가 높은 서로 다른 두 층으로 구성된 가공변질층이 형성되며, 이 중 결정성이 낮은 산화층이 KOH 수용액에 대한 내식성을 가진다고 보고하였다.

단결정 실리콘 표면의 나노스크래치시 발생 및 형성되는 나노변형거동과 가공변질층을 참고문헌<sup>5,9</sup>내용과 함께 도시하였다 (Fig. 4). 간략하게 설명하면 다음과 같다. Fig. 4 (a)는 앞서 고찰한 가공팁과 소재표면의 마찰에 의한 기계화학적 반응에 의하여 형성되는 산화물/수산화물 용기부이다. B 층 (Fig. 4 (b))과 C 층 (Fig. 4 (c))은 스크래치된 표면의 밑에 형성되며 각각 비정질 산화층과 전위 밀집층을 나타내고 있다. Morita 는 B 층과 C 층을 합쳐서 가공변질층이라 명명하였으며, <20 wt. % KOH 용액을 사용한 식각공정에서는 B 층의 마스크 효과 (masking effect)가 주로 작용하지만, >30wt. % KOH 용액에서는 C 층의 식각촉진효과 (etching promotion effect)가 주로 작용한다고 보고하였다. KOH 용액은 실리콘은 잘 식각시키지만 산화물은 잘 식각시키지 않기 때문에 산화/수산화물 용기부 (Fig. 4 (a))도 고려되어야 한다. 그러나, 산화/수산화물 용기부 (Fig. 4 (a))의 발생 메커니즘에 대해서는 보고된 바 있으나, KOH 용액 내에서의 식각 특성에 대한 연구는 아직 발견되지 않고 있다. Morita 는 마찰력간 현미경의 area scan 기능에 의하여 형성된 넓은 영역의 가공 면에 대한 분석을 실시하였기 때문에 산화/수산화물 용기의 영향에 대한 고찰은 하지 못했다.

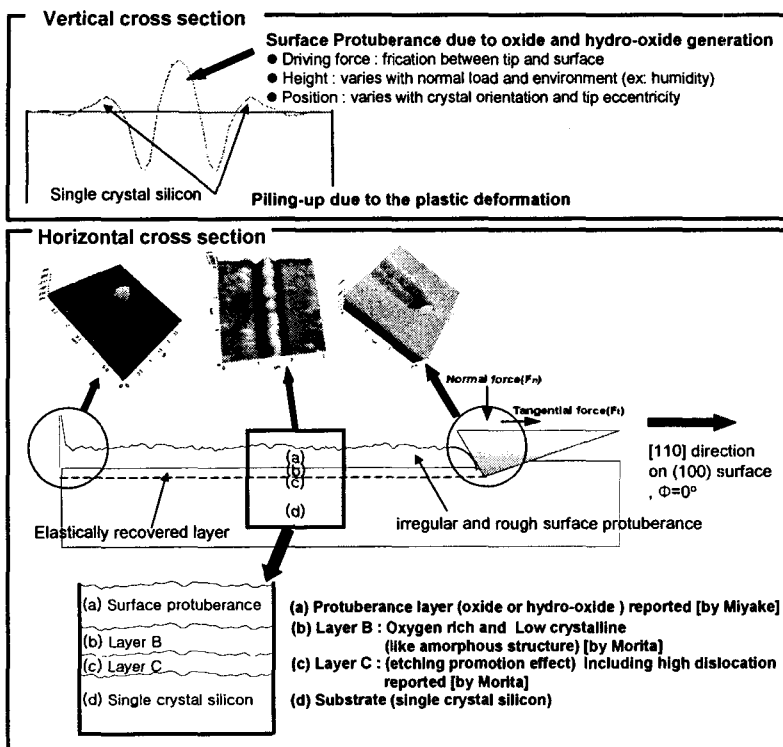


Fig. 4 Masking effect of the silicon surface after nanoscratch ( Miyake<sup>5,6</sup>, Morita<sup>7-9</sup>)

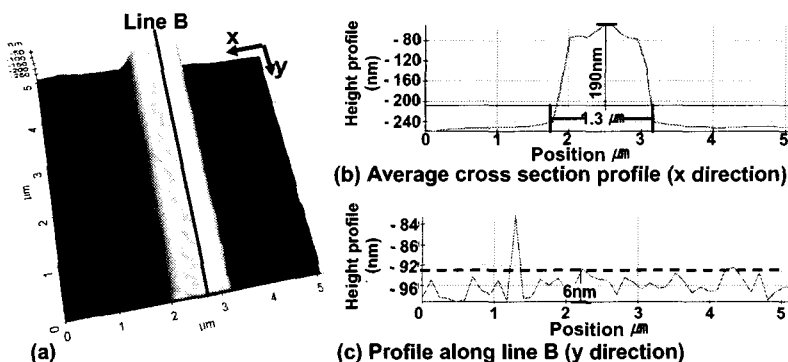


Fig. 5 AFM image and section profiles of the nanoscratched silicon surface after wet etching in the 20 wt.% KOH solution for 15 mins

가공 팁과 소재의 마찰에 의하여 형성된 산화/수산화물 용기부가 식각 후 얻어지는 구조체 형상에 미치는 영향을 고려하기 위하여 20wt.% KOH 용액에서 15 분간 식각 실험을 실시하였다. 시험편으로는 Fig. 3의 시험편이 사용되었다.

KOH 용액 내에서의 단결정 실리콘의 식각 메카니즘은 참고문헌<sup>14</sup>에서 자세하게 소개되어 있

므로 생략하였다.

Fig 5는 식각 실험 후 시험편의 AFM 사진을 나타내고 있다. Fig. 5 (a)는 식각 후 시험편표면을 나타내고 있는데, Fig. 3 (a)와 비교해 보면 역상구조가 되어 있음을 알 수 있다. B 층 (Fig. 4 (b))이 20 wt.% KOH 용액 내에서 식각 마스크로서 작용하여 그루브의 식각을 억제하고, 주위의 실리콘이 식각

되면서 상대적으로 그루브의 높이가 증가한 것이다. 주목할 점은 철(convex)형 구조체의 폭 (Fig. 5 (b))은 CLS 에 의하여 가공된 그루브의 폭 (Fig. 3 (b))과 일치하며, 종횡비(aspect ratio)가 크게 증가한 점이다. Fig. 3 (b)와 Fig. 5 (b)에서 알 수 있듯이, 폭과 깊이가 각각 1.3  $\mu\text{m}$  와 14 nm 인 그루브가 식각실험 후에는 폭과 높이가 각각 1.3  $\mu\text{m}$  와 190 nm 인 철(convex)형 구조체로 변화되었다. 또한, 철 형 구조체의 표면상태가 그루브의 표면상태에 비해 개선되었음을 관찰할 수 있다. Fig. 5 (c)의 분석결과에서 알 수 있듯이 표면요철은 6 nm 로 감소하였다. 팁과 표면의 마찰에 의하여 형성된 용기층 (Fig. 4 (a)) 이 식각 후 구조체 형상에 미치는 영향은 명확하게 관찰되지 않았다. 위 결과는 산화물 용기층의 식각 마스크 효과는 비정질 산화층 (Fig. 4 (b))의 마스크효과에 비해 매우 작음을 나타내고 있다.

### 3.3 수직하중의 영향

수직하중조건은 소재 표면에 형성되는 가공변질층의 형성영역에 매우 큰 영향을 미친다. 스크래치 공정에서 소재 소재표면에 부하되는 수직하중이 식각 후 구조체 형상에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실험을 수행하였다.

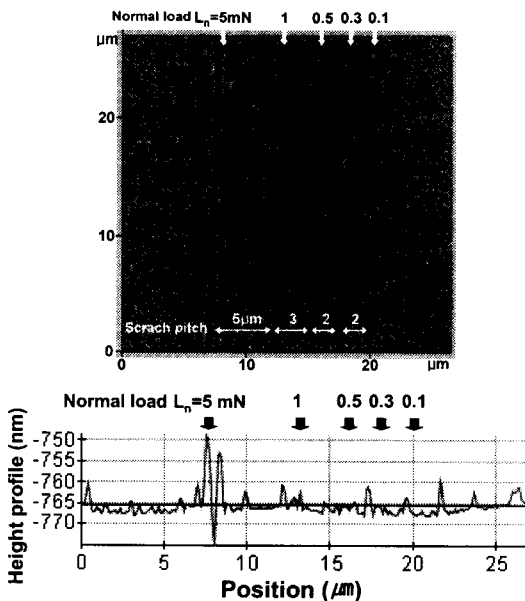


Fig. 6 Si (100) surface after CLS with various normal loads 0.1, 0.3, 0.5, 1, 5 mN

Fig. 6 은 수직하중 ( $L_n$ )을 0.1, 0.3, 0.5, 1, 1.5 mN 로 변화시키면서 스크래치 한 후의 표면모습을 나타내고 있다. 스크래치 방향은 실리콘 (100) 표면에 [110] 방향으로 고정시켰다. 시편표면의 표면조도가 약 2-5 nm 였기 때문에 수직하중이 0.5 mN 이하인 경우에는 스크래치가 명확하게는 관찰되지 않았다.

Fig. 7 의 AFM 사진은 Fig. 6 의 시편을 20 wt.% KOH 용액에서 15 분간 식각시킨 후의 표면모습을 나타내고 있다. KOH 식각 후의 시편 표면의 형상에 대한 정량적인 측정 데이터를 Fig. 8 과 Table 2 에 정리하였다.

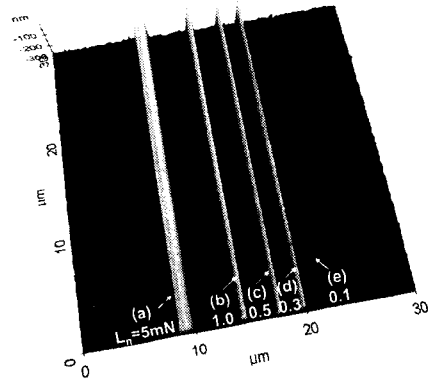


Fig. 7 AFM image of scratch tracks after wet etching in the 20 wt.% KOH solution for 15 mins

Fig. 8 (a)~(d)에서 알 수 있는 바와 같이  $L_n = 0.3-5$  mN 의 조건에서는 수직 하중의 증가와 더불어, 구조체의 폭 ( $W_{max}$ )과  $\theta$ 는 증가하였으나 높이 ( $H_{max}$ )는 200 nm 로 일정함을 알 수 있다. 수직하중의 변화에 불구하고 KOH 식각 후에 얻어진 구조체의 높이가 일정했던 것은, 소재 표면에 가해지는 하중이 높을수록 생성되는 가공변질층의 내식성도 증대하였기 때문으로 판단된다. 그러나, Fig. 8 (e) 에서 관찰할 수 있는 바와 같이  $L_n = 0.1$  mN 인 경우, 구조체의 높이와  $\theta$ 는 각각 40 nm 와  $18^\circ$  로 현저하게 감소되었다. 이러한 갑작스러운 구조체 형상의 변화에 대한 원인은 단결정 실리콘의 KOH 용액 내에서의 식각 특성으로부터 유추할 수 있다. 이 KOH 용액 내에서 단결정 실리콘의 식각방지 (etch stop) 면은 (111)이라는 것은 잘

알려져 있으며<sup>14</sup>, 반도체 공정에서는 이 사실을 이용하여 V-그루브를 제작한다. 즉, (100) 면과 (111)이루는 각이 54.7°이 되면 식각 속도는 무시할 수 있을 정도로 감소된다. Fig. 8 (d) 에서 알 수 있는 바와 같이  $L_n=0.3$  mN의 경우  $\theta$ 는 53°이다. 앞서 전술한 단결정 실리콘의 결정방위에 따른 식각 특성을 고려하면 더 이상의  $\theta$ 값의 증가는 어려움을 알 수 있으며, Fig. 8 (e)에서 확인할 수 있었다.

Table 2 Morphology of convex structures after wet etching in the 20 wt.% KOH solution for 15 mins

Normal load ( $L_n$ , mN)	Max. height ( $H_{max}$ , nm)	Max. width ( $W_{max}$ , $\mu$ m)	$\theta^\circ$
5	200	1410	37.4
1	200	810	37.5
0.5	200	590	49
0.3	200	470	53
0.1	40	350	18

이상의 결과로부터 KOH 식각 후 얻어지는 철(convex)형 구조체의 형상 및 치수는 스크래치에 의하여 얻어진 그루브의 형상 및 치수에 큰 영향을 받을 수 있었다. 그루브의 형상 및 치수는 가공팁의 형상 및 치수에 큰 영향을 받는다. 현재 실제로 제작 가능한 나노인덴터용 다이아몬드 팁끝의 반경은 40~100 nm이다. 그루브의 폭을 감소시키기 위하여 가공 깊이를 감소시킬 경우 구형의 팁끝과 시편표면과의 탄성접촉이 지배적으로 발생하여 시편의 소성변형량이 감소하게 되는 문제점이 있다. 따라서, 더욱 정밀한 나노 구조체를 제작하기 위해서는 팁 끝 반경이 매우 작은 팁, 예를 들면 크롬 또는 다이아몬드 코팅 AFM 팁, 을 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

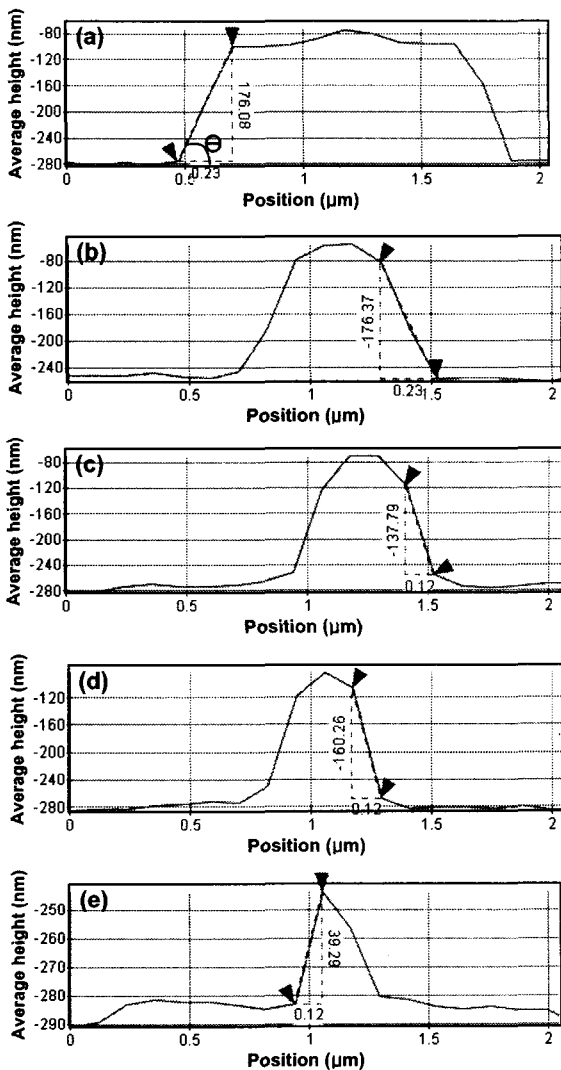


Fig. 8 Effect of the normal load on the morphology of the convex structure after KOH etching

#### 4. 결론

단결정 실리콘의 연성영역 초미세가공시 발생하는 변형거동과 가공표면의 식각마스크 효과에 대한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 일정하중스크래치 (스크래치 속도: 10  $\mu$ m/s, 수직하중: 5 mN) 를 이용하여 단결정 실리콘표면에 가공한 그루브 (폭: 1.3 $\mu$ m, 높이: 14nm)를 20wt.% KOH 용액에서 15 분간 식각시켜 철(convex)형 구조체 (폭: 1.3  $\mu$ m, 높이: 190 nm)를 제작하였다. 식각공정을 통하여 얻어진 철형 구조체의 폭은 그루브의 폭과 거의 일치하였으며, 종횡비 및 표면상태가 크게 향상되었다.
- (2) 팁과 실리콘 표면의 마찰에 의하여 형성된 산화/수산화물 용기층이 식각 후 구조체 형상에

미치는 영향은 명확하게 관찰되지 않았다. 위는 산화물 용기층의 식각 마스크 효과는 가공변질층의 마스크효과에 비해 매우 작음을 나타내고 있다.

- (3) 수직하중 ( $L_n=5, 1, 0.5, 0.3, 0.1$  mN)조건 별로 가공한 Si (100) 시편들을 20 wt.% KOH 용액에서 15 분간 식각시켜 철(convex)형 구조체들을 제작하였다.  $L_n=5 - 0.3$  mN의 범위에서는, 수직하중의 감소와 더불어 철(convex)형 구조체의 폭은 1410, 810, 590, 470, 350 nm로 감소하였으나 높이는 일정하였다. 위는 가공변질층의 KOH 용액에 대한 내식성이 수직하중에 비례함을 나타낸다. 또한, 구조체의 벽면과 (100)면이 이루는 각 ( $\theta$ )은 수직하중이 감소함에 따라 37.4, 37.5, 49, 53°로 증가하였다. 반면에  $L_n=0.1$  mN인 경우에는 폭 350 nm, 높이 40 nm,  $\theta = 18^\circ$ 인 철(convex)형 구조체가 제작되었다.  $L_n=0.1$  mN 시편의 급격한 형상 및 치수 변화는 (111) 면 ( $\theta = 54.7^\circ$ )의 식각방지 (etch-stop) 효과가 원인으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단(KRF)에서 지원하는 선도연구자지원 연구과제인 “나노인텐테이션을 이용한 극미세패턴의 Maskless 패턴 제작 기법 개발”의 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Shin, Y.J., Cho, J.D., Lee, E.S., "Trends of soft lithography technology," J. Kor. Soc. of Prec. Eng., Vol. 20, No. 4, pp. 5-11, 2003.
2. Chang, W.S., Shin, B.S., Whang, K.H., "Nanoprobe application technologies," J. of Korean Society of Pre. Eng., Vol. 20, No. 3, pp. 5-14, 2003.
3. Avouris, Ph., Hertel, T. and Martel, R., "Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication," Appl. Phys. Lett., Vol. 2, pp. 285-287, 1997.
4. Campell, P.M., Snow, E.S., "Proximal probe-based fabrication of Nanometer-scale devices," Proc. SPIE-Intl. Soc. Optical Engr., Vol. 3975, pp. 943-948, 1999.
5. Miyake, S., Kim, J., "Microprotuberance processing of silicon by diamond tip scanning," Jpn. Prec. Eng., Vol. 65, No. 12, pp. 1788-1792, 1999.
6. Kim, J.D., Miyake, S., "Nanometer scale protuberance and groove processing of silicon by mechanochemical action and its application of etching mask," Jpn. Prec. Eng., Vol. 68, No. 5, pp. 695-699, 2002.
7. Ashida, K., Morita, N., Toshida, Y., "Study on nanomachining process using mechanism of a friction force microscope," JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No. 1, pp. 244-260, 2001.
8. Ashida, K., Chen, L., Morita, N., "New maskless micro-fabrication technique of single-crystal silicon using the combination of nanometer-scale machining and wet etching," Proc. of 2nd euspen Int. Conf., Turin, Italy, May, pp. 78-81, 2001.
9. Chen, L., Morita, N., Ashida, K., "Maskless pattern formation which used alkaline etching and nanoscale cutting by using friction force microscope," Jpn. Prec. Eng., Vol. 66, No. 11, pp. 23-27, 2000.
10. Shibata, T., Fuji, A., Makino, E., "Crystallographic orientation dependence of slip deformation behavior in diamond-turned single-crystal silicon," Jpn. Prec. Eng., Vol. 65, No. 9, pp. 1319-1324, 1999.
11. Ichida, Y., Frej, N.B., Yousefi, R., "Ductile-mode mirror cutting of single-crystal silicon (1st report) - Effects of cutting speed on the brittle/ductile mode transition behavior in cutting process," Jpn. Prec. Eng., Vol. 64, No. 4, pp. 608-612, 1998.
12. Sumomogi, T., Nakamura, M., Endo, T., Goto, T., Kaji, S., "Evaluation of surface and substrate cracks in nanoscale-machined single-crystal Si by scanning force microscope and scanning laser microscope," Mater. Charact., Vol. 48, pp.141-145, 2002.
13. Koshimizu, S., Otsuka, J., "Microindentation tests of single crystal silicon - microdeformation behavior and measurement of ductile to brittle transition," Jpn. Prec. Eng., Vol. 64, No. 11, pp.1643-1647, 1998.
14. Lang, W., "Silicon microstructuring technology," Mater. Sci. & Eng., Vol. R17, pp.1-55, 1996.