

# Tribo-Nanolithography 를 이용한 액중 나노가공기술 개발

박정우#, 이득우\*, 카와세기 노리타카\*\*, 모리타 노보루\*\*

## Nanoscale Fabrication in Aqueous Solution using Tribo-Nanolithography

Jeong Woo Park<sup>#</sup>, Deug Woo Lee<sup>\*</sup>, Noritaka Kawasegi<sup>\*\*</sup> and Noboru Morita<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

Nanoscale fabrication of silicon substrate in an aqueous solution based on the use of atomic force microscopy was demonstrated. A specially designed cantilever with diamond tip, allowing the formation of damaged layer on silicon substrate easily by a simple scratching process (Tribo-Nanolithography, TNL), has been applied instead of conventional silicon cantilever for scanning. A slant nanostructure can be fabricated by a process in which a thin damaged layer rapidly forms in the substrate at the diamond tip-sample junction along scanning path of the tip and simultaneously the area uncovered with the damaged layer is being etched. This study demonstrates how the TNL parameters can affect the formation of damaged layer and the shape of 3-D structure, hence introducing a new process of AFM-based nanolithography in aqueous solution.

**Key Words** : Nanoscale fabrication (나노 가공), Silicon (실리콘), Diamond tip (다이아몬드 팁), Cantilever (켄티레버), Atomic Force Microscope (원자력 현미경), Nanolithography (나노리소그래피)

### 1. 서론

최근 나노과학 및 나노기술이 대두됨에 따라 이러한 연구를 뒷받침할 수 있는 새로운 나노스케일의 가공방법이 필요하게 되었다. LIGA process (lithography[Li], electroforming[G], and molding[A]) 는 전기전자 분야, 미세가공분야, 바이오 기기분야, 마이크로 센서 및 액츄에이터 분야, 화학분야 등 여러 산업 분야에서 그 기능을 발휘하고 있다. 그러나 이 방법은 2 차원 구조물의 성형에 있어서 나노스케일 (nano-scale) 급의 구조물 형성이 가능한 반

면에 3 차원 구조물의 경우에는 거의 불가능하며, 이를 해결하기 위하여 여타의 가공방법을 통해 다수 시도되고 있다. 특히 최근 시도되는 가공법은 전기화학적 제거가공을 이용한 미세 3 차원구조물의 구현에 관한 연구 또는, Scanning Probe Microscopy (SPM), 즉 AFM 및 STM 의 탐침 및 켄티레버(cantilever)를 이용한 새로운 방법 등이 도출되고 있다. 전자의 경우에는, 실리콘, 스테인레스 재료에 펄스 전기화학 가공을 적용하여 미세 3 차원 형상의 구조물 가공에 성공하여, 전기화학 가공을 마이크로 가공에 접목할 수 있는 가능성을

접수일: 2004 년 8 월 17 일; 게재승인일: 2004 년 11 월 19 일

# 부산대학교 ERC/NSDM

E-mail calcci@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3092

\* 부산대학교 나노과학기술학부

\*\* Toyama University, Department of Engineering, JAPAN

제시하였다.<sup>1,2</sup> 후자의 AFM 및 STM 을 이용한 방법의 경우에는 팁과 샘플의 접촉, 비접촉에 따라서 크게 두가지로 분류가 된다. 첫째는, SPM 팁과 샘플이 접촉한 상태에서 (contact mode) 기계적 또는 분자의 이동에 의하여 원하는 패턴이나 구조물을 형성시키는 방법이다.

Yoshida, Morita 그룹<sup>3</sup>에서는 자체 제작한 가공용 AFM 팁을 사용하여, AFM 관찰 상에서 얻은 이미지를 그대로 패턴화 시키는 데 성공하였고, Mirkin 그룹<sup>4</sup>에서는 펜에 잉크를 찍어 글자를 쓰는 원리를 도입한 DPN (Dip-Pen Nanolithography) 기술을 최초로 개발하여 나노스케일의 새로운 공정을 선보였다. 또한 Kolb 그룹<sup>5</sup>에서는 전기화학적 방법으로 미세탐침의 끝단에 구리원자를 부착하고, 이를 금 표면에 다시 전사시키는 방법으로 구리 클러스터의 제작을 성공하였다.

둘째는, 비접촉 모드에서 SPM 팁과 샘플간의 미소한 전기화학적 반응에 의하여 생성된 산화막 자체를 하나의 구조물, 즉 나노와이어 또는 나노패턴으로 형성하는 방법이다. 이러한 SPM 기반의 전기화학적 패턴닝 연구는 Dagata 그룹<sup>6</sup>이 최초로 제안하였으며, Quate 그룹<sup>7</sup>에서는 Dai 그룹<sup>8</sup>에서 개발한 탄소나노튜브 부착 팁을 사용하여 전기화학적 방법으로 미소한 선을 형성하였다. 즉, 팁의 선단반경이 작으면 작을수록 그 분해능은 뛰어나게 향상될 것임은 자명한 사실이며, 이를 이용하여 선폭 30 nm 이하까지도 접근이 가능하다는 것을 보여주었다.

상기의 연구자들 외에도, Snow 그룹<sup>9,10</sup>에서도 금속 팁을 사용하여 10 nm 이하의 선을 형성하는 가능성을 보였다. 또한, Perez-Murano 그룹<sup>11,12</sup>에서는 알루미늄 코팅된 웨이퍼 상에서 도전성 팁과 금속의 산화반응을 이용하여 미소한 패턴을 형성시키고, 이를 NEMS 에 적용하기 위하여, CMOS 상에 패턴닝 실험을 수행하여 질량센서의 제작을 시도하였다. Gwo 그룹<sup>13,14</sup>에서는 실리콘 웨이퍼 및 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 코팅표면 상에 산화반응을 일으켜 미소패턴을 형성시키고 그 메커니즘 분석에 관한 연구를 수행하였다.

지금까지 기술한 방법 이외에도, 나노패터닝을 구현하기 위한 여타의 방법이 다수 연구되고 있다. 즉, 전통적인 전자빔을 이용한 패턴닝 기술 이외에

도 이온빔 밀링 (FIB)<sup>15,16</sup>을 이용한 방법, Proton 빔을 이용한 패턴닝<sup>17</sup>, 나노임프린팅 (Nano-imprinting) 기법을 이용한 나노패터닝<sup>18</sup> 등이 제안되고 있으며, 이를 적용하여 나노스케일로의 접근을 위한 연구가 계속 진행되고 있다.

본 연구에서 제안하는 방법은 자체 개발한 다이아몬드 팁이 부착된 캔틸레버를 공구로 하여, 에칭액 (etchant) 중에서 AFM 에 의한 기계적 나노리소그래피 공정 (Tribo-Nanolithography, TNL)을 수행하는 방법이다. 즉, 다이아몬드 팁에 의한 기계적 변형층의 생성과 동시에 에칭효과를 발생시키면서 마이크로, 나노 영역의 기계적 마스크리스 리소그래피 (maskless lithography)기법을 개발하고자 한다.

## 2. 실험방법

Fig. 1 은 액중 TNL 프로세스를 구현하기 위한 실험장치를 나타내는 개략도이다. 시료표면과 캔틸레버 사이에 KOH 수용액을 첨가한 상태로, 캔틸레버 끝단의 다이아몬드 팁에 의한 기계적 가공을 수행한다.

시편은 도핑을 하지 않은 (100) 실리콘을 사용하였다. 가공 전에는 아세톤 세정 및 순수 세정 후, 자연 산화막의 제거를 위해 5% HF 에서 1 분간 침지하였다.

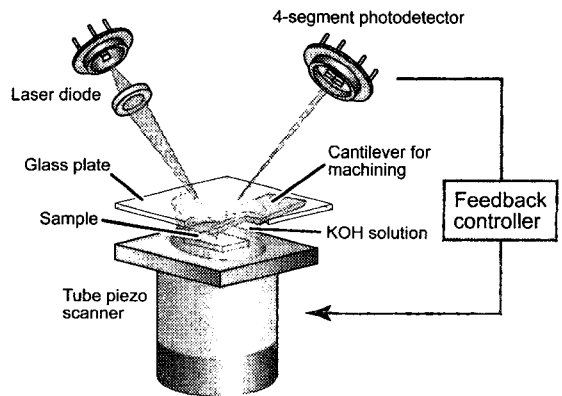


Fig. 1 Scheme of experimental setup for TNL in aqueous solution

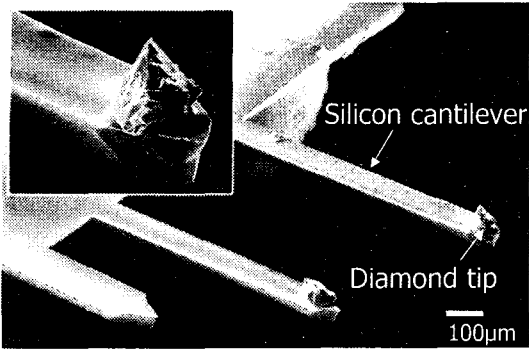


Fig. 2 SEM image of diamond tip cantilever for TNL

세정 된 시편은 액중 AFM 실험용 플레이트에 마운팅 된다. 공구는 가공성을 부여하기 위하여, 통상의 AFM 관찰용 실리콘 캔티레버가 아니라, 자체 제작한 다이아몬드 팁이 부착된 캔티레버를 적용하였다. 실리콘 웨이퍼에 캔티레버 형상의 마스크를 만들어 이방성 에칭 후, 레버의 최끝단에 다이아몬드를 부착하는 방법으로 제작하였으며, 그 형상은 Fig. 2 에 도시하였다.

본 방법에 의하면 임의 형상의 캔티레버를 만드는 것이 가능하며, 계산을 통해 굽힘량을 예상하여 수직하중을 조절할 수 있다. 본 연구에 사용한 AFM 은 SHIMADZU 사의 SPM 9500J-2 이며, 콘택트 모드(contact mode) 에서 가공 및 관찰을 수행하였다. 용액은 5mass% 농도의 KOH 수용액이며, <110> 방향으로 가공을 수행하였다. 상세한 실험조건은 Table 1 에 표시하였다.

### 3. 액중 Tribo-Nanolithography 의 메커니즘

Fig. 3 은 본 연구에서 제안하는 액중 나노가공 기술의 반응 메커니즘을 나타낸다. 실리콘 표면에 KOH 수용액을 주입하면, 실리콘 표면은 화학반응에 의한 에칭효과가 발생하기 시작한다.

상기의 반응이 일어나는 중에 자체 제작한 AFM 다이아몬드 팁 캔티레버가 적절한 수직하중으로 시료표면을 기계적으로 가공하기 시작하면, 가공된 부분의 표면에 결정성이 낮은 변질층이 생성되기 시작한다.<sup>19</sup>

이 과정에 생성되는 변질층은 KOH 수용액에 대해 내부식성을 가지는 것으로 판명되었다.<sup>3</sup>

Table 1 Experimental conditions

Sample substrate	Silicon (100)
Processing direction	<110>
Normal force ( $\mu\text{N}$ )	137~673
Speed in Y dir. (nm/s)	39~195
Speed in X dir. ( $\mu\text{m/s}$ )	40~200
Pitch of processing line (nm)	39~312
KOH concentration (mass%)	5
Isopropyl alcohol (vol.%)	5
Subsequent etch	1 min with sonication

따라서, 캔티레버에 의해 가공이 수행된 부분은 변질층, 즉 마스크층이 생성되어 에칭이 진전되지 않고 그대로 멈추게 되며, 그렇지 않은 부분은 에칭현상이 계속되어 용해작용이 일어난다. 이러한 상태로 마스크층 생성과 에칭현상이 동시에 발생되면, 캔티레버의 이송방향 (Fig. 3 의 y 방향)에 따른 마스크층 생성의 시간적 차이로 인한 경사진 돌출형 3차원 구조물이 형성될 수 있다.

Fig. 4 는 본 실험의 작업 프로세스 및 메커니즘을 간략히 나타낸 것으로 크게 3 단계 즉, AFM 세팅 작업, 액중 나노가공 수행작업 그리고 추가 초음파 에칭 작업으로 이루어진다. 초기에 AFM 캔티레버가 시료의 표면에 접근하고, 이후 KOH 수용액의 주입 및 액중나노가공을 개시하여 경사진 3차원 구조물을 만든다.

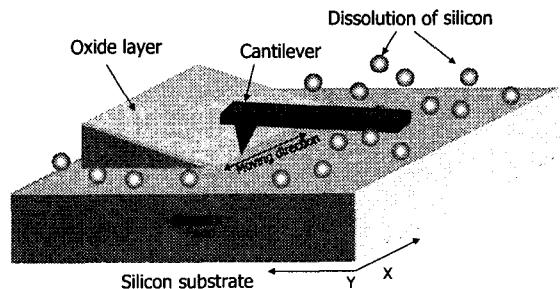


Fig. 3 Process model of TNL in aqueous solution

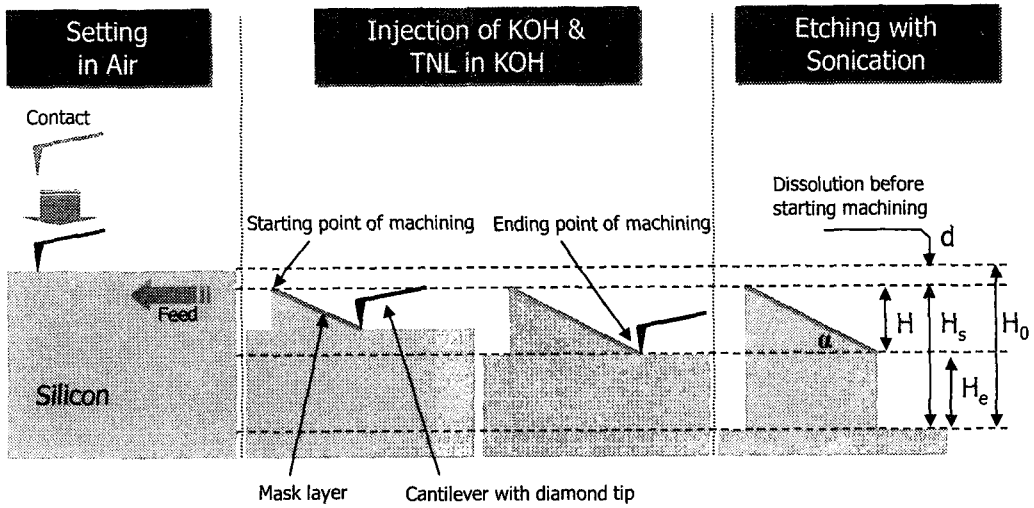


Fig. 4 Experimental procedure and nomenclature

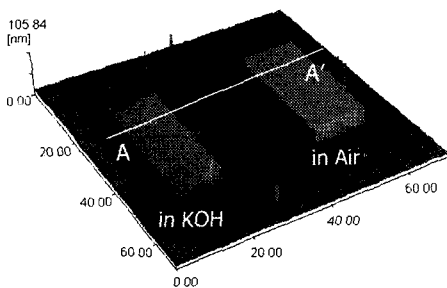
이 때, KOH 수용액 주입 후 가공이 시작되는 시간 동안에 약간의 에칭이 수행되어, 가공이 시작되는 시작점은 시료의 최표면 ( $H_0$ )보다  $d$  정도 낮아진다. 가공이 완료되면 초음파를 부가한 상태에서 1 분간 에칭을 추가 수행한다. 편의상 시료의 최하단부에서 가공 시작점까지의 거리를  $H_s$  라 하고 가공 완료 점까지의 거리를  $H_e$ , 경사진 면의 높이차를  $H$ , 경사각도를  $\alpha$  라고 정의한다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

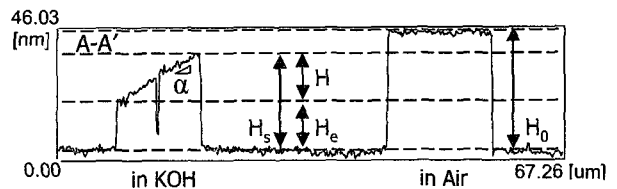
##### 4.1 가공면 분석

Fig. 5 는 공기중 및 KOH 수용액 중에서 수행한

실험결과를 비교하여 나타낸 것으로, 초기에 공기중에서 실리콘 표면을 가공 한 후, KOH 수용액을 주입하여 액중가공을 수행하였다. 통상의 공기중에서 가공한 부분은 일정한 높이를 가지는 구조물로 형성되는 것을 알 수 있으며, 액중에서 가공한 부분은 마스크층의 생성과 에칭현상의 시간적 차이로 인해 경사진 구조물로 형성되는 것을 알 수 있다. 여기서, 상기의 경사면을 분석해 보면 가공 시간에 따른 실리콘의 에칭율 (etch rate)을 계산할 수 있다. 처음 캔티레버가 실리콘에 접촉할 때를 에칭시간의 시작점으로 하고 가공이 끝날 때를 에칭시간의 종점으로 하면, 총 가공시간  $t$  에 따른 에칭량  $H (=H_s - H_e)$ 의 변화율이 에칭율이 되어 etch



(a)



(b)

Fig. 5 (a) AFM topography image of nanostructures prepared by the TNL method in aqueous 5mass% KOH solution (left) or air (right). (b) Cross-sectional topography trace of the line marked A-A' in (a)

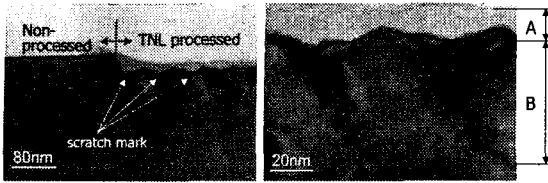


Fig. 6 Cross-sectional TEM images of a section machined by diamond tip cantilever

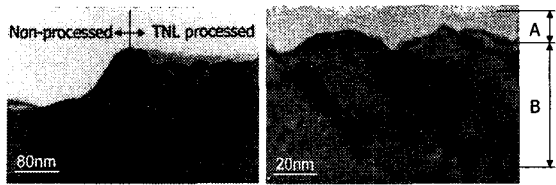


Fig. 7 Cross-sectional TEM images of a section etched in KOH

rate =  $H/t$  [nm/sec] 의 값이 됨을 알 수 있다. 즉, 표면 프로파일 자체가 시간에 따른 실시간 에칭상태를 나타낸다는 것을 간단히 알 수 있다.

본 실험결과를 분석해 보면,  $etch\ rate = H/t \approx 6.2$  nm/s 가 됨을 알 수 있다. 즉, 표면 프로파일 자체가 5mass% KOH 수용액에 대한 실리콘 고유의 실시간 에칭현상을 나타낸다. 이러한 결과를 응용하면, 여러 가지 재료의 에칭을 측정 및 에칭반응 중에 발생하는 여타의 변화를 표면 프로파일을 통해 감지 할 수 있을 뿐 만 아니라, 역으로 에칭반응 중 마스크층 생성 속도의 조절을 통하여 프로파일의 경사를 임의로 바꿀 수 있는 가능성을 시사한다. 표면에 생성되는 마스크층의 특성을 고찰하기 위하여 표면의 단면구조를 TEM 분석한 결과 Fig. 6, Fig. 7 과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 가공방향은 지면에 대해 수직 방향인  $\langle 110 \rangle$ 이며 주기적인 이송 스크래치가 관찰된다. 가공부의 최표면에는 두께 약 10 nm 의 결정성이 낮은 층 (Fig. 6 의 A)이 형성되고 그 이하에는 약 50 nm 의 전위생성층 (Fig. 6 의 B)이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7 은 Fig. 6 의 시편을 KOH 용액에서 에칭한 후, 단면을 관찰한 TEM 사진이다. 가공부 주위에는 에칭현상이 진전됨과 동시에, 가공부의 마스크 효과에 의하여 단차가 발생하는 것을 알 수 있으며, Fig. 6 의 결과와 비교해 보면, 가공부의 단면 미세구조의 형상은 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

따라서 상기의 결과에 의하면, AFM 다이아몬드

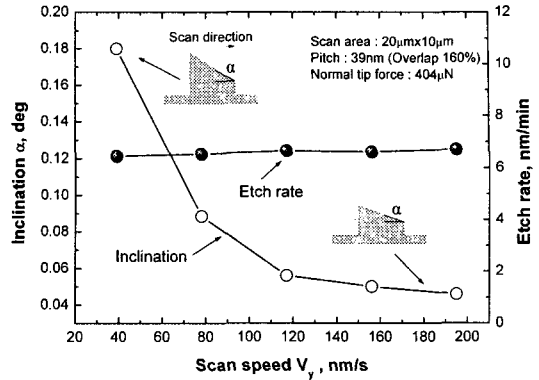


Fig. 8 Change in inclination ( $\alpha$ ) of the protruding structures generated on increasing the speed in the y-direction,  $V_y$ , from 39 to 195 nm/s

팁 캔틸레버에 의하여 가공된 부분의 표면은 에칭에 대한 강한 내식성을 가지고 있는 마스크층이라는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 경사각 결정 파라미터 분석

본 실험에서는 가공 중 발생하는 기포를 최소화 하고, 원활한 AFM 다이아몬드 팁의 운동을 위하여 5mass% 농도의 KOH 를 선택하여 실험을 수행하였다.

Fig. 8 은 Fig. 3 의 Y 방향의 스캔 속도,  $V_y$  에 따른 돌출형 구조물의 경사각 ( $\alpha$ ) 변화를 나타낸 것이다. 일정한 농도의 KOH 수용액에서 실험을 수행하였으므로  $etch\ rate$  는 모두 일정한 값인 6~7 nm/min 을 유지하고 있으며, 이는 5mass% KOH 수용액의  $etch\ rate$  를 나타내고 있다는 것 뿐만 아니라, 어느 조건에서도 가공 중 마스크층의 용해는 일어나지 않았다는 것을 알 수 있다. 따라서 일정한 농도의 용액에서는 가공속도의 변화를 통해 에칭량의 조절이 가능하기 때문에 3 차원 구조물의 경사각 제어가 가능하게 된다. 즉, 가공속도를 느리게 하면 다량의 실리콘이 에칭현상에 의해 용해 제거 되어 경사각이 커지게 되며, 반대로 가공속도를 빠르게 하면 에칭시간의 부족에 의한 에칭량의 감소로 인하여 경사각이 작아지게 된다.

본 실험에서는 가공속도 39 nm/s 에서 0.18°의 경사각, 195 nm/s 에서 0.05° 까지의 경사각 제어가 가능하였다. 이러한 결과를 응용하면, 가공속도의 변화를 통해 서로 다른 경사각을 가지는 3 차원 돌출형 구조물을 간단히 형성할 수 있다.

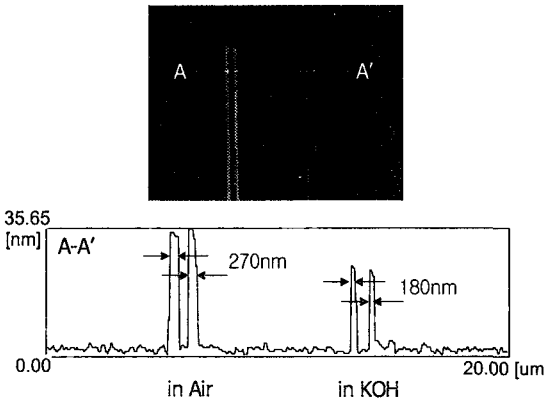


Fig. 9 AFM topography image of bar structures with different width prepared by TNL in air and in KOH

다음은 스캔피치, 즉 중복 가공의 정도가 마스크층의 내식성 및 구조물의 경사각에 미치는 영향에 대하여 분석해 보았다. 우선, 다이아몬드 팁에 의해 발생하는 마스크층의 폭을 측정하기 위하여, 단 일회성의 선 가공을 수행한 후 에칭작업을 거쳐 측정한 결과 Fig. 9 와 같은 데이터를 얻을 수 있었다. 즉, 공기중에서 가공을 수행하였을 경우에는 약 270nm 정도의 폭을 가지는 마스크층을 발견할 수 있다. 따라서 공기중에서는 다이아몬드 팁의 중심에서 약 135nm 정도의 범위까지 마스크층이 발생한 것을 알 수 있다. 이는 가공 시 스캔피치의 조절로 밀도가 낮은 마스크층을 형성하느냐, 밀도가 높은 마스크층을 형성하느냐의 기준이 될 수 있다.

중복가공에 의한 겹침의 정도를 overlap (%) 이라 하면 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$overlap = \left( \frac{W}{P} - 1 \right) \times 100(\%) \quad (1)$$

$W =$  width of oxide bar

$P =$  scan pitch

즉, 공기중에서 270nm의 스캔피치로 가공을 수행하면 단층의 마스크층이 형성되고(overlap 0%), 135nm의 스캔피치로 가공하면 같은 장소를 두 번에 걸쳐 중복 가공하는 결과가 되어, 이중의 마스크층(overlap 100%)을 형성할 수 있다는 것이다.

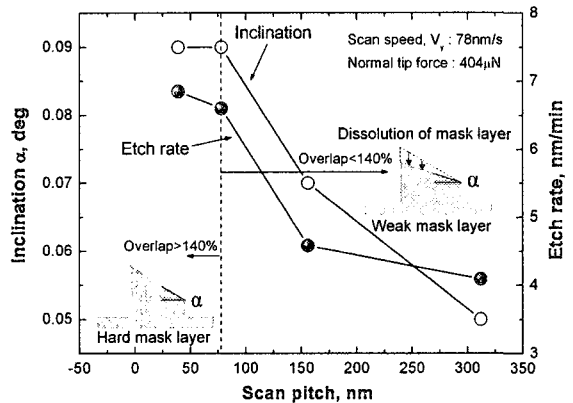


Fig. 10 Inclination ( $\alpha$ ) and etch rate variation of nano structure as a function of scan pitch

한편, 5mass % KOH 수용액에서 가공한 경우에는 보다 작은 180 nm 정도의 폭을 가지는 마스크층이 생성되는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 통상의 공기중 보다는 KOH 용액중의 산소농도가 낮고, 실리콘 표면의 경취성이 떨어지기 때문에 상대적으로 변형층의 폭이 좁아진다고 고찰된다.

Fig. 10 은 스캔 피치 및 overlap 정도에 따른 돌출형 구조물의 경사각 변화를 관찰한 그래프이다. 76 nm 피치 (overlap 140%)를 경계로 하여, 그 이하 (overlap > 140%)일 경우에는 경사각의 변화가 거의 없으나 76 nm 이상 (overlap < 140%)일 경우에는 경사각이 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 etch rate를 분석해 보아도 76 nm 이상의 피치에서 그 수치가 6 nm/min 이하로 변화하는 것을 알 수 있다.

즉, 일정한 농도의 KOH 수용액임에도 불구하고 etch rate가 변화하는 것은 가공중 발생한 마스크층의 에칭에 대한 저항성이 약해져, 시간이 지나감에 따라 용해되고 있다는 것을 의미한다.

스캔 피치에 따라, 캔티레버의 다이아몬드 팁이 실리콘 표면의 동일한 부분을 어느 정도 겹치면서 가공을 진행하기 때문에, 그 겹침의 정도 (overlap)가 마스크층의 에칭에 대한 저항성과 비례하는 특성을 가지게 된다. 따라서 76 nm 피치 이상의 실험조건에서는 overlap 수치가 낮기 때문에 밀도가 낮은 마스크층의 형성으로 인하여 경사각의 유지가 불가능하게 되며, 일정하지 않은 etch rate를 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

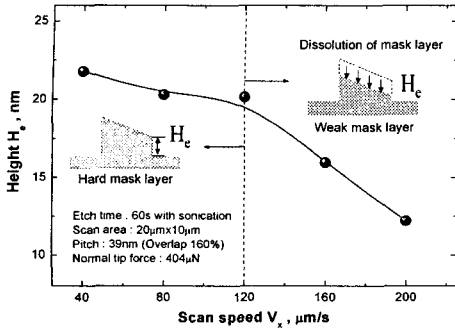


Fig. 11 Height ( $H_c$ ) variation as a function of scan velocities,  $V_x$

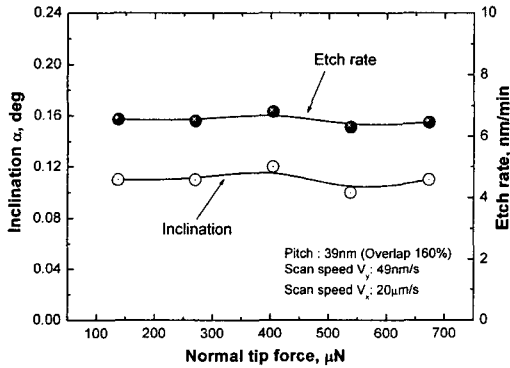


Fig. 12 Inclination ( $\alpha$ ) variation as a function of normal forces

이번에는 X 방향의 스캔 속도,  $V_x$ 에 따른 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 11 과 같이 가공 후 동일한 조건에서 1 분간 초음파를 부가한 상태에서 에칭을 수행하였다. 120  $\mu\text{m}/\text{sec}$  이하의 조건에서는  $H_c$ 의 변화가 거의 없는 반면에, 120  $\mu\text{m}/\text{sec}$  초과의 가공조건에서는 점점 단차가 줄어들고 있는 것을 보이고 있다. 즉, 에칭을 수행할 때 마스크층의 용해가 발생하였다는 것을 의미한다. 빠른 스캔 속도에서 가공을 수행할 경우에는 켈티레버의 다이아몬드 팁이 실리콘 표면을 제대로 가공하지 못하고 미끄러지는 현상이 발생하기 때문에 마스크층의 발생이 균일하지 못하여, 다소 밀도가 낮은 마스크층이 생성하게 된다. 그로 인하여 에칭에 대한 저항성이 낮게 되고, 결과적으로  $H_c$ 의 변화를 가져온다. 이와 반대로, 느린 스캔 속도의 경우에는 비교적 밀도가 높은 마스크층이 생성되어 에칭에 대한 저항성이 강해지는 결과가 발생한다.

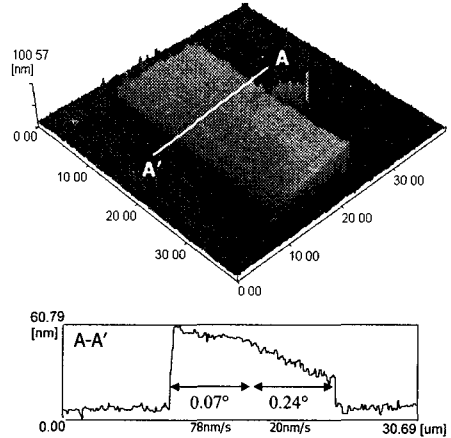


Fig. 13 AFM topography image of slant nanostructure prepared by the TNL method in 5mass% KOH solution

Fig. 12 는 켈티레버의 수직력에 따른 변화를 나타내는 결과이다. 수직력의 변화에 대한 경사각 또는 etch rate 의 변화는 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 수직력에 대해서는 마스크층의 저항성이 그다지 크게 변화하지 않기 때문에, 무리한 수직하중으로 가공을 수행하여 다이아몬드 팁의 마모를 초래할 필요가 없다는 것을 알 수 있다. Fig. 13 은 본 연구의 액중 TNL 기법에 의하여 제작한 미세 구조물이다.  $V_y = 78 \text{ nm}/\text{sec}$ 의 초기 속도에서는  $0.07^\circ$ 의 기울기를 가지는 경사면이 형성되었고, 이후  $20 \text{ nm}/\text{s}$ 로 속도를 늦추어 가공한 결과 가공시간이 길어짐에 따라 실리콘의 용해시간이 증가되어  $0.24^\circ$ 의 경사면이 형성 되었다. 경사진 표면의 거칠기는 약  $4 \text{ nm Ra}$ 의 값을 나타내었다. 즉, AFM 켈티레버의 가공속도 조절로 서로 다른 2 개의 사각을 가지는 비탈진 3 차원 구조물의 구현이 가능하였다.

## 5. 결론

TNL 기법을 이용한 액중 나노가공을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 자체 제작한 다이아몬드 팁 켈티레버가 부착된 AFM 을 나노가공기로 하여, 액중에서 실리콘 표면을 가공하기 시작하면, 결정성이 낮은 마스크층의 생성과 KOH에 의한 에칭이 동시에 발생하여, 켈티레버의 가공방향에 따른 마스크층 생성의 시간적 차이로 인

한 경사진 돌출형 3 차원 나노 구조물이 형성됨을 확인하였다. 다이아몬드 팁의 가공속도, 가공피치 및 overlap, 수직하중 등의 가공 파라미터를 통해 3 차원 구조물의 경사각 및 etch rate 변화를 관찰한 결과, y 방향의 가공속도만이 3 차원 구조물의 경사각 변화를 초래하였고, 이외의 파라미터는 마스크 층의 에칭에 대한 내식성과 깊은 관련이 있다는 것을 알 수 있었다. SPM 응용 마스크리스 리소그래피 기술은 현재로서는 미완성의 가공기술이지만 그 가능성은 분명히 존재한다고 기대한다.

### 참고문헌

- Schuster, R. and Kirchner, V., "Electrochemical Micro machining," *Science*, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
- Park, J. W., Lee, E. S. and Moon, Y. H., "A Study on the Electrochemical Micro-machining for fabrication of Micro Grooves," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 4, pp. 101-108, 2002.
- Ashida, K., Morita, N. and Yoshida, Y., "Study on Nano-Machining Process Using Mechanism of a Friction Force Microscope," *JSME Int. J.*, Vol. 44, No. 1, pp. 244-253, 2001.
- Piner, R. D., Zhu, J., Xu, F., Hong, S. and Mirkin, C. A., "Dip-pen Nanolithography," *Science*, Vol. 283, pp. 661-663, 1999.
- Kolb, D. M., Ullmann, R. and Will, T., "Nanofabrication of Small Copper Clusters on Gold (111) Electrodes by a Scanning Tunneling Microscope," *Science*, Vol. 275, pp. 1097-1099, 1997.
- Dagata, J. A., "Device Fabrication by Scanned Probe Oxidation," *Science*, Vol. 270, pp. 1625-1626, 1995.
- Wilder, K. and Quate, C. F., "Noncontact Nanolithography Using Atomic Force Microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, No. 17, pp. 2527-2529, 1998.
- Dai, H., Hafner, J. H., Rinzler, A. G., Colbert, D. T. and Smalley, R. E., "Nanotubes as Nanoprobes in Scanning Probe Microscopy," *Nature*, Vol. 384, pp. 147-150, 1996.
- Snow, E. S. and Campbell, P. M., "AFM fabrication of Sub-10-Nanometer Metal-Oxide Devices with in-Situ Control of Electrical Properties," *Science*, Vol. 270, pp. 1639-1641, 1995.
- Snow, E. S., Jernigan, G. G. and Campbell, P. M., "The Kinetics and Mechanism of Scanned Probe Oxidation of Si," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 76, No. 13, pp. 1782-1784, 2000.
- Davis, Z. J., Abadal, G., Hansen, O., Borise, X., Barniol, N., Perez-Murano, F. and Boisen, A., "AFM Lithography of Aluminum for Fabrication of Nanomechanical Systems," *Ultramicroscopy*, Vol. 97, pp. 467-472, 2003.
- Abadal, G., Perez-Murano, F., Barniol, N. and Aymerich, X., "Field Induced Oxidation of Silicon by SPM: Study of the Mechanism at Negative Sample Voltage by STM, ESTM and AFM," *Appl. Phys. A*, Vol. 66, pp. S791-S795, 1998.
- Chien, F. S.-S., Chang, J.-W., Lin, S.-W., Chou, Y.-C., Chen, T. T., Gwo, S., Chao, T.-S. and Hsieh, W.-F., "Nanometer-Scale Conversion of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> to SiO<sub>x</sub>," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 3, pp. 360-362, 2000.
- Klauser, R., Hong, I.-H., Su, H.-J., Chen, T. T., Gwo, S., Wang, S.-C., Chuang, T. J. and Gritsenko, V. A., "Oxidation States in Scanning-Probe-Induced Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> to SiO<sub>x</sub> Conversion Studied by Scanning Photoemission Microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 19, pp. 3143-3145, 2001.
- Steckl, A. J., Mogul, H. C. and Morgen, S., "Localized Fabrication of Silicon Nanostructures by Focused Ion Beam," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60, No. 15, pp. 1833-1835, 1992.
- Yavas, O., Ochiai, C., Takai, M., Hosono, A. and Okuda, S., "Maskless Fabrication of Field-Emitter Array by Focused Ion and Electron Beam," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 22, pp. 3319-3321, 2000.
- Kan, J. A., Bettiol, A. A. and Watt, F., "Three-Dimensional Nanolithography using Proton Beam Writing," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, No. 8, pp. 1629-1631, 2003.
- Austin, M. D. and Chou, S. Y., "Fabrication of 5 nm Linewidth and 14 nm Pitch Features by Nanoimprint Lithography," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, No. 26, pp. 5299-5301, 2003.
- Park, J. W., Kawasegi, N., Morita, N. and Lee, D. W., "Tribo-Nanolithography of Silicon in Aqueous Solutionbased on Atomic Force Microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, No. 10, pp. 1766-1768, 2004.