

나노/마이크로 PDMS 채널 제작을 위한 마스크리스 실리콘 스텐퍼 제작 및 레오로지 성형으로의 응용

윤성원* · 강충길**

(2003년 11월 5일 접수)

Maskless Fabrication of the Silicon Stamper for PDMS Nano/Micro Channel

S. W. Youn and C. G. Kang

Abstract

The nanoprobe based on lithography, mainly represented by SPM based technologies, has been recognized as a potential application to fabricate the surface nanostructures because of its operational versatility and simplicity. However, nanoprobe based on lithography itself is not suitable for mass production because it is time consuming method and not economical for commercial applications. One solution is to fabricate a mold that will be used for mass production processes such as nanoimprint, PDMS casting, and others. The objective of this study is to fabricate the silicon stamper for PDMS casting process by a maskless fabrication technique using the combination of nano/micro machining by Nanoindenter® XP and KOH wet etching. Effect of the Berkovich tip alignment on the deformation was investigated. Grooves were machined on a silicon surface, which has native oxide on it, by constant load scratch (CLS), and they were etched in KOH solutions to investigate chemical characteristics of the machined silicon surface. After the etching process, the convex structures were made because of the etch mask effect of the mechanically affected layer generated by nanoscratch. On the basis of this fact, some line patterns with convex structures were fabricated. Achieved groove and convex structures were used as a stamper for PDMS casting process.

Key Words: Nanoscratch, Wet Etching, PDMS, Si (100)

1. 서론

현재, 극미세패턴 및 구조체 제작에 가장 많이 쓰이고 있는 광리소그래피(Optical lithography) 공정에 있어서 초기설비투자비용 및 공정 비용은 제작 가능한 최소 선폭의 물리적 한계와 더불어 장애가 되고 있다. 광리소그래피 공정을 대체 또는 보완 하기 위하여 주사터널현미경(STM)이나 원자력간 현미경(AFM) 등을 이용한 나노프로브

기반 리소그래피 기술들이 다양하게 연구되고 있다.^(1~11) 나노양극산화, 정적/동적 나노스크래치 등과 같은 나노프로브 기반기술이 유용하게 사용되는 이유는 10nm 이하 정밀도의 구조체의 제작이 가능하고, 공정이 간단하며 초기장비설치 및 장비 가동에 드는 비용이 매우 저렴하기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 반면에, 대량생산공정에는 부적합하고 소재의 선택에 있어 제한이 있다는 단점이 있다. 그러나 초미세 프로브기술을 이용하여 나노임프린트나 PD

* 부산대 대학원 정밀기계공학과

** 부산대 기계공학부

MS 레오로지 성형 공정과 같은 대량전사공정용 스탬퍼를 제작한다면 위와 같은 문제점을 개선시킬 수 있다. 기계적 가공의 또 하나의 문제점으로는 가공표면 주위에 남는 버(burr) 및 마멸된 시료 잔류물을 들 수 있는데, 이는 재현성이나 정밀도를 감소시키는 원인이 된다. 이러한 문제는 화학적 식각기술을 병용함으로써 개선될 수 있다.

일반적으로 알려진 기계-화학적 마이크로/나노 구조물 제작 기술의 기본 개념은 시료표면에 화학적 가공의 보호층 역할을 할 식각마스크(또는, 레지스트)를 형성시킨 후, 화학적 식각공정에 의해 원하는 형상을 얻는 공정이다. 따라서, 목적형상에 따라 별도의 마스크 형성 공정이 병행되어야 한다. 예를 들면, 화학적 식각공정을 위한 마스크로서, 실리콘 소재의 경우 가열 성장(Thermal oxidation)시킨 SiO_2 , Si_3N_4 , P+ 이온 도핑 등이, 금속박막의 경우에는 자기조립분자막(self-assembled monolayer, SAM)⁽¹¹⁾ 등이 쓰인다.

한편, 최근에는 다이아몬드 팁을 이용하여 기계적으로 가공된 실리콘 소재 표면의 식각 특성을 마스크리스 나노가공기술에 응용한 연구 예가 발견되고 있다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 다이아몬드 팁을 이용하여 가공된 실리콘 표면에는 결정 및 화학적 변화가 발생한다. 그 중 한 예는 가공 팁과 표면의 마찰에 의한 실리콘 결합의 파괴에 의하여 발생하는 산화물/산화물 용기층의 생성이다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾ 또 한가지 예는, 스크래치 된 표면에 비정질 산화층과 전위 밀집층으로 구성된 가공변질층의 형성이다.⁽⁶⁻⁸⁾

본 연구는 나노스크래치와 습식식각 기술을 병용한 대면적 극미세 패턴의 마스크리스 제작기술의 개발을 위한 연구의 일환으로써, 나노스크래치와 이방성 식각 만을 이용한 마이크로/나노 구조체 제작 기술을 소개한다. 나노인텐터의 일정하중 스크래치(constant load scratch, 이하 CLS 로 표기) 기능을 이용하여 KOH 수용액에 내식성을 가지는 비정질 산화층을 형성시킨 후, KOH 용액을 이용한 화학적 식각을 실시하여 철(convex)형 마이크로/나노구조체를 제작하였다. 대량전사공정용 스탬퍼로의 응용 가능성을 검토하기 위하여, PDMS 레오로지 성형공정에 응용하여 PDMS 샘플 채널을 제작하였다.

2. 가공방법 및 장치

2.1 단결정 실리콘 스탬퍼 제작

연성영역 나노/마이크로 가공 실험을 위하여 미

국 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.

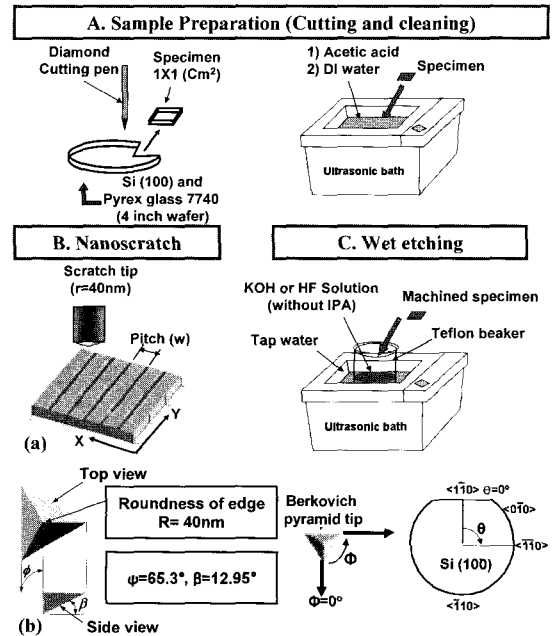


Fig. 1 Schematic diagram of (a) experimental procedure and (b) Geometry of scratch tip and meaning of symbol Φ and θ

Fig. 1(a)는 실험의 개략도를 나타내고 있으며 CLS, 식각실험 및 시편표면관찰은 상온(20~23℃)에서 이루어 졌으며, 상대습도 범위는 약 41~45%였다. 시편의 세척 및 식각 공정을 위해서 초음파 세척기가 사용되었다. Berkovich 팁의 형상 및 치수와, 기호 Φ 의 의미는 Fig. 1(b)에 나타나 있다. 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 μ N (default value)보다 훨씬 낮게 설정하였다.

소재로는 0.5mm 두께의 n-type Si(100) 웨이퍼가 사용되었다. 절단된 Si(100) 샘플은 초음파세척기

를 이용하여 아세톤과 DI액에서 세척되었다. 인위적으로 생성되는 H-passivation층^(5,13)의 영향을 배제하기 위하여 HF용액에 의한 자연산화막 제거는 하지 않았다. 세척 후 AFM으로 측정된 시편표면의 표면조도는 약 $R_a=2\sim 5\text{nm}$ 였다. 본 연구에서는 단결정 실리콘의 결정방위에 따른 가공특성의 차이⁽¹⁴⁻¹⁵⁾는 고려되지 않았다. 별도의 언급이 없는 경우 CLS가공 실험 조건은 Table 1과 같으며, 스크래치 방향은 약한 결합으로 인하여 단결정 실리콘의 고정밀 가공에서 흔히 사용되는 [100] 방향($\Theta=0^\circ$)으로 고정하였다. CLS 가공 된 시편은 20 wt. % KOH 용액에서 15분간 식각 되었다.

Table 1 Ductile mode nanomachining conditions

Normal load (L_n)	Scratch rate (S_s)	Φ	Post profile load (L_p)
5 mN	10 $\mu\text{m/s}$	0°	0.1 μN

2.2 PDMS 성형

엘라스토머인 폴리디메틸실록산(PDMS)은 시편 표면과의 정합 접착성, 낮은 계면자유에너지와 화학적 불활성을 가지는 표면, 균질성 및 등방성 등의 특징으로 인하여 극미세 패턴과 구조물을 만드는 데 널리 쓰이고 있다.⁽¹⁶⁻¹⁷⁾

제작된 실리콘 스템퍼의 대량전사 공정용 몰드로의 응용 예를 보여주기 위하여 PDMS 성형실험을 하였다. PDMS(Sylgard 184, Dow-Corning; 1:10 curing agent: Sylgard) 레진을 실리콘 스템퍼에 부은 후 3 일간 상온에서 동안 경화(curing) 시켰다. 일반적으로는 가열을 통해 가교반응(다리결침 반응 cross-linking)을 촉진시킴으로써 경화시간을 단축시킨다. 그러나 이 경우 온도를 정확하게 제어하지 않으면 수증기의 증발에 의하여 PDMS 내부에 기포가 발생하는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 기포제거를 위한 진공장비를 사용하지 않았기 때문에 상온 경화 (curing) 시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CLS 에 의한 십자패턴 가공

유리, 단결정 실리콘 및 세라믹 등의 경취성(hard-brittle) 재료의 절삭가공에 있어서, 날카로운 팁끝을 가지는 공구에 의하여 임계가공깊이(critical depth)를 고려한 초미소 절삭을 하면, 소성변형이 주로 발생하는 재료제거기구가 성립된다. 이 결과

크랙이 없고 양호한 가공표면을 얻을 수 있음이 잘 알려져 있으며, 이러한 가공법을 경취성 재료의 연성영역가공(ductile regime machining)이라 일컫는다. 이러한 연성영역가공은 원자력간 현미경을 이용한 단결정 실리콘 웨이퍼의 나노가공 공정에도 응용되고 있으며, dynamic plowing 이나 FFM scratch 기술 등을 예로서 들 수 있다.

나노인텐터를 이용한 스크래치의 경우 AFM 에 비하여 수직하중범위가 매우 넓기 때문에 소재에 가해지는 수직하중이 크면 취성 파괴가 발생할 수도 있다. 취성 파괴의 발생은 스크래치 실험 시 측정되는 마찰계수나 마찰력곡선의 큰 폭의 상승과 같은 기복으로 판단할 수 있다. Table 1 에 요약된 CLS 실험조건은 저자들의 과거 연구에서 연성영역 나노 가공(ductile-regime nanomachining)에 적합함을 실험적으로 확인한 바 있다.⁽¹⁸⁾

다이아몬드 팁과 피 가공 소재와의 접촉형상은 소재의 변형거동 및 제거기구에 큰 영향을 미치는 인자들 중 하나이다. Mulliah⁽¹⁹⁾는 다이아몬드 팁의 스크래치 방향이 단결정 은(silver)의 나노변형거동 및 마찰학적 특성에 미치는 영향을 분자동역학 기법을 이용하여 예측한 바 있다. 시뮬레이션결과에 따르면, 나노스크래치 공정 중에는 다이아몬드 팁의 진행방향의 전방과 측면에 파일-업이 발생하며 또한 생성된 파일-업의 높이는 다이아몬드 팁의 방향에 큰 영향을 받는다. 예를 들면, $\Phi=90^\circ$ 인 경우는 $\Phi=0^\circ$ 에 비하여 변형에 대한 저항을 많이 받으므로 파일-업의 높이와 마찰계수 값이 상대적으로 크다.

스크래치 팁의 선단부와 시편의 접촉형상이 소재변형거동에 미치는 영향이 실험적으로 조사되었다. Table 1의 실험조건에서 Berkovich 팁의 방향(Φ)을 0° 와 90° 로 변화시키면서 가공한 십자패턴의 AFM 사진을 Fig. 2에 나타내었다. $\Phi=90^\circ$ 인 그루브 표면은 $\Phi=0^\circ$ 인 경우에 비하여 더 깊고 거친 표면을 나타내고 있다.

스크래치 팁의 방향에 따른 실리콘 변형거동의 차이를 조사하기 위하여 Fig. 2 A 영역을 확대하여 Fig. 3(a)에 나타내었다. Fig. 3(b)는 $\Phi=0^\circ$ 인 경우의 가공 표면을 나타내고 있다. 파일-업(pile-up)현상뿐만 아니라 파일-업 사이에 표면윤기 현상이 관찰되고 있다. 소재가 소성변형 될 때 발생하는 파일-업(또는, 싱킹-인)의 형상 및 높이는 소재의 E/Y값과 가공경화 지수와 밀접한 있음은 잘 알려져 있다.⁽²⁰⁾ 또한, 표면윤기 현상에 대해서도 이미 보고된 바가 있으며 팁과 실리콘 표면과의 마찰이

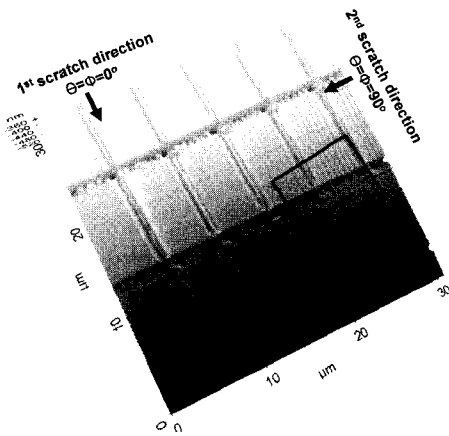


Fig. 2 Crisscross patterns on Si (100) surface with the different tip orientation (Φ) of 0° and 90°

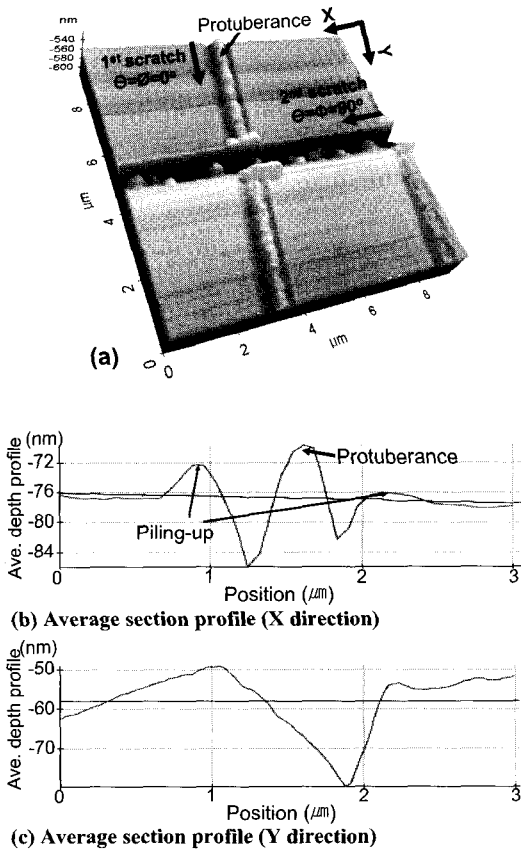


Fig. 3 The AFM image and the cross section profiles of the Si (100) after the CLS experiments with the different tip orientation (Φ) of 0° and 90°

주 원인으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 용기현상의 메커니즘을 간략하게 설명하면 다음과 같다. 실리콘 표면을 다이아몬드 나노 팁으로 가공하면, 팁과 표면 마찰부의 후방에 인장 및 전단 응력이 작용하여 실리콘 결합의 국부적인 파괴가 발생하며, 그 부분이 대기 중에 존재하는 산소, 수소와 반응하여 산화물 및 수산화물을 형성한다. 반면에 마찰부의 전방에는 압축잔류응력이 작용하여 산소가 주입되기 어려워져서 반응량이 감소한다. Fig. 3 (c)은 $\Phi=90^\circ$ 인 경우의 가공 표면을 나타내고 있다. $\Phi=90^\circ$ 방향으로 가공된 그루브의 깊이가 $\Phi=0^\circ$ 인 경우에 비하여 더 깊은 이유는 탄소성 변형보다 취성파괴 기구가 더 지배적으로 작용하였기 때문으로 판단된다.

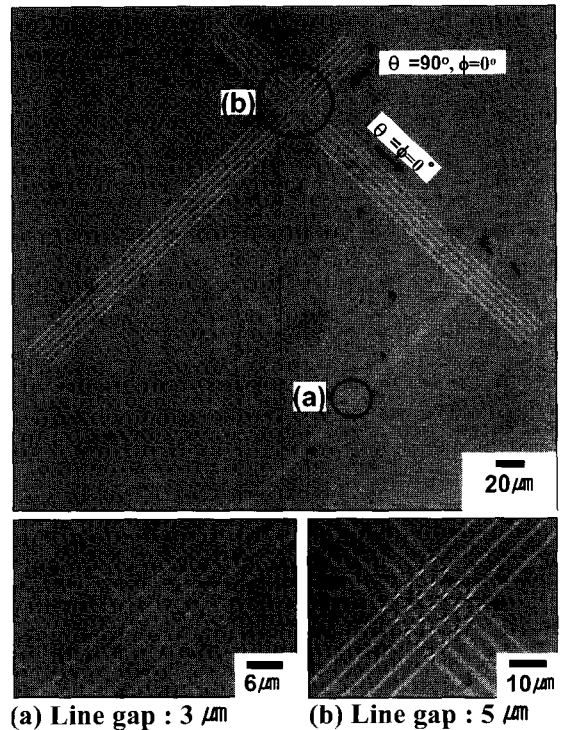


Fig. 4 Optical images of the crisscross patterns with various line gaps of 5 and 3 μm

Table 1의 실험조건에서 패턴피치를 5 μm 와 3 μm 로 변화시키면서 가공한 십자패턴의 광학현미경 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 매우 깨끗한 가공표면을 나타내고 있다. Berkovich 팁의 가공 선단부와 시편의 접촉형상이 변형거동에 미치는 영향(예: 취성파괴)을 배제하기 위하여, 팁 방향은 $\Phi=$

0°로 고정 시키고 대신에 Si(100) 시편을 0, 90°로 회전시켰다.

더욱 정밀한 관찰을 위하여 Fig. 4(a)에서 보여주고 있는 패턴을 AFM으로 관찰하였다. 전체적으로 양호한 가공표면을 나타내고 있으나, 교차부에 최종스크래치 방향에 평행하게 발생하는 파일업(Pile-up)에 의한 막힘 현상이 관찰된다. 위의 발생원인은, 본 연구에서는 나노스크래치 실험을 하중조절모드(Load-control mode)에서 수행하였기 때문이다. 즉, 교차 부분에서는 두번의 변형이 발생하게 된다. 이와 같은 문제는 가공깊이조절모드(depth-control mode)에 의한 가공을 실시한다면 개선될 것으로 판단된다.

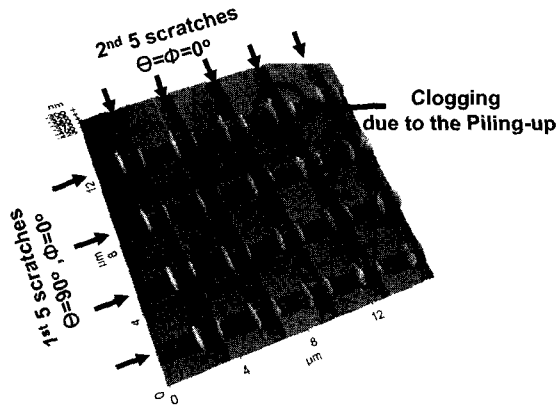


Fig. 5 Crisscross pattern fabricated with the Berkovich tip direction of $\Phi=0^\circ$

3.3 교차부를 가지는 PDMS 유로 제작

3.3.1 나노스크래치 된 표면의 식각 특성

단결정 실리콘 표면을 다이아몬드 팁으로 가공하면 팁과 소재표면의 마찰에 의한 기계화학적 반응뿐만 아니라, 결정학 및 화학적 변화가 스크래치 된 표면 밑에 발생한다. 참고문헌⁽⁶⁻⁸⁾의 TEM, Rutherford back sputtering, Auger electron spectroscopy, Laser roman spectroscopy 분석결과에 따르면, 다이아몬드 팁에 의하여 가공된 실리콘 표면에는 결정성이 낮은 산화층과 전위밀도가 높은 서로 다른 두 층으로 구성된 가공변질층이 형성되며, 이중 결정성이 낮은 산화층이 KOH 수용액에 대한 내식성을 가진다.

단결정 실리콘 표면의 나노스크래치 실험에서 발생되는 표면용기와 가공변질층을 참고문헌⁽⁶⁻¹⁰⁾ 내용과 함께 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6(a)은 다이아몬드 팁과 소재표면에서 발생하는 기계화학적

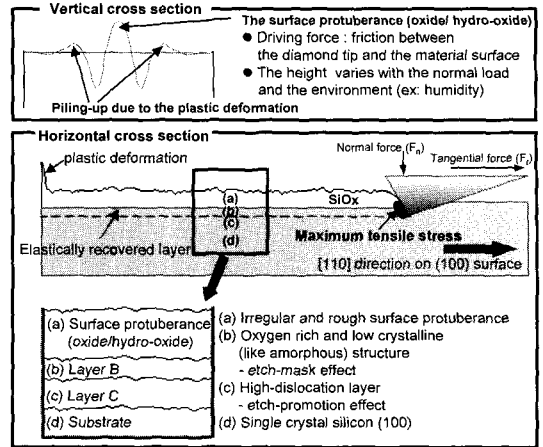


Fig. 6 Cross section of the nanoscratched silicon surface

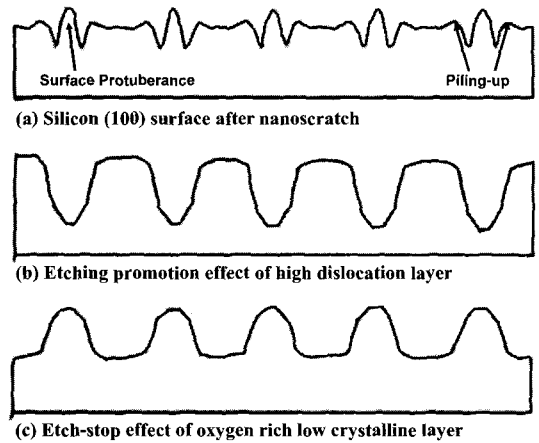


Fig. 7 Layout of the groove shape change before and after the KOH wet etching; (a) before etching, (b) after etching with 20 wt.% KOH solution, (c) after etching with 30 wt.% KOH solution

반응에 의하여 형성되는 산화물/수산화물 용기부⁽⁹⁻¹⁰⁾를 나타내고 있다. 또한, Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)는 스크래치 된 표면의 밑에 형성된 비정질 산화층과 전위 밀집층을 각각 나타내고 있다. 참고문헌⁽⁶⁻⁸⁾에서는 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c) 층을 합쳐서 가공변질층이라 명명하였으며, <20 wt. % KOH 용액을 사용한 식각공정에서는 Fig. 6(b)층의 식각 마스크 효과가 주로 작용하지만, >30wt. % KOH 용액에서는 Fig. 6(c)층의 식각촉진 효과가 주로 작용한다고 보고하였다. 따라서, 가공변질층을 이용한 마스크리

스 패턴 제작공정의 개략도는 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

3.3.2 실리콘 스탬퍼 제작 및 PDMS 성형 공정으로의 응용

나노스크래치에 의하여 형성된 비정질 산화층 (Fig. 6(b))의 식각 마스크 효과를 이용하여 PDMS 성형공정을 위한 실리콘 스탬퍼를 제작하였다.

비정질산화층을 형성시키기 위하여 Si(100) 표면에 별표(*) 모양으로 그루브를 가공하였다.(Fig. 8) CLS 가공조건은 Table 1과 같으며, Berkovich 팁 방향 (Φ) 및 실리콘의 결정방향은 Fig. 8에 표기하였다. Fig. 4의 경우와 마찬가지로 최종스크래치 방향에 수평으로 파일-업이 발생하여 교차부에 막힘 현상이 관찰되고 있다.

Fig. 9는 Fig. 8의 시편을 20wt.% KOH-용액에서 15분간 식각 시킨 후의 AFM 사진을 나타내고 있다. 식각실험 전의 시편(Fig. 8)과 비교해 보면 매우 개선된 표면상태를 나타내고 있다. 그러나 Fig. 9(a)에서 관찰할 수 있듯이, 교차부에서는 다소 높이기폭이 있는 불균일한 표면이 관찰되는데, 나노스크래치 공정에서 발생된 세 번의 변형이 주원인으로 판단된다. Fig. 8에서 관찰한 바 있는 최종스크래치에 의하여 형성된 파일-업의 흔적을 뚜렷이 관찰할 수 있다. 교차부를 제외한다면 세 경우($\Phi=0, 120, 240^\circ$) 모두 동일한 구조체 형상 및 크기가 관찰되었다. 한 예로, Fig. 9(b) 영역에 대한 AFM 확대 사진 및 단면분석결과를 나타내었다. 식각 전후의 구조체 형상 및 치수의 정량적인 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 3의 AFM 단면분석결과와 비교하였다. Fig. 4와 Fig. 8의 시편은 가공조건이 동일하기 때문이다. 나노스크래치에 의하여 형성된 비정질산화층(Fig. 6(b))이 20wt.-%KOH 용액 내에서 식각 마스크로써 작용하여 그루브의 식각을 억제하고, 주위의 실리콘이 식각 되면서 상대적으로 그루브의 높이가 증가하였다. 식각 전후의 구조체 형상을 비교해 보면 역상구조임을 알 수 있다. 주목할 점은 식각 후 얻어진 철(convex)형 구조체의 폭이 CLS에 의하여 가공된 그루브의 폭과 일치하며, 종횡비가 크게 증가한 점이다. 폭과 깊이가. 각각 $1.3\ \mu\text{m}$ 와 14nm 인 그루브가 식각실험 후에는 폭과 높이가 각각 $1.3\ \mu\text{m}$ 와 190nm 인 구조체로 변화되었다. 또한, 철 형 구조체의 표면상태가 그루브의 표면상태에 비하여 개선되었음을 관찰할 수 있었다. 산화/수산화물

용기부가 식각 후 구조체 형상에 미치는 명확한 영향은 관찰되지 않았다. 위의 산화물 용기부의 식각속도가 비정질 산화층에 비하여 매우 빠름을 나타내고 있다.

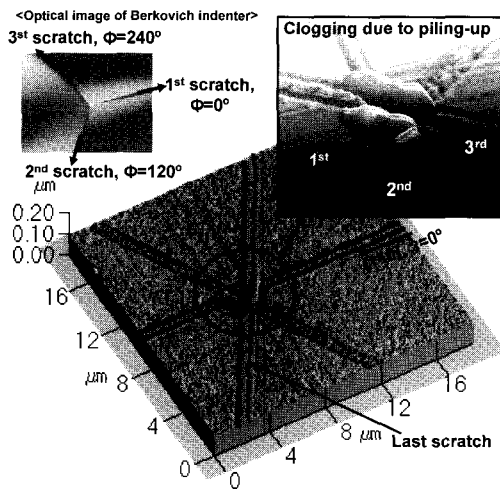


Fig. 8 AFM image of the silicon with radial line structures ($\Phi=0, 120, 240^\circ$)

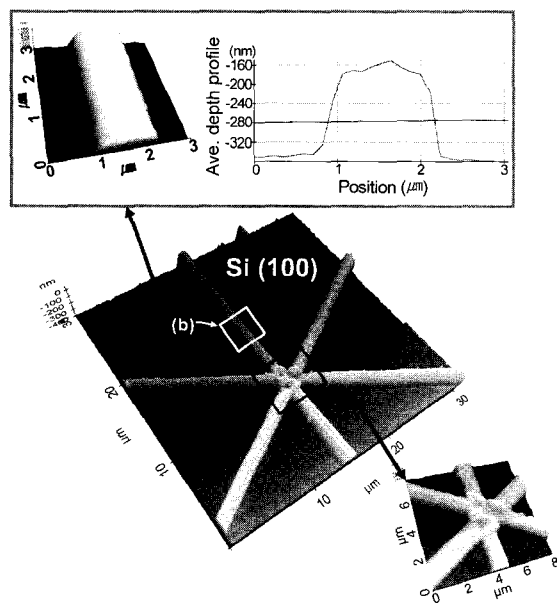


Fig. 9 AFM image of the silicon with radial line structures after 20 wt. %-KOH wet etching

4. 결론

나노인텐터의 일정하중 스크래치 기능과 KOH 습식식각 기술을 병용하여 PDMS 레올로지 성형 공정용 스탬퍼를 제작하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 다이아몬드 팁의 스크래치 방향이 $\Phi=0^\circ$ 인 경우에는 탄소성변형이 주로 발생하였으나, $\Phi=90^\circ$ 인 경우에는 취성과파괴에 의한 재료의 제거가 주로 관찰되었다. 위는 팁과 소재의 접촉형상 및 접촉면적의 변화에 따른 마찰특성의 변화가 원인으로 판단된다.

(2) 나노스크래치 된 실리콘 표면의 식각특성을 이용하여 실리콘 스탬퍼를 제작하였다. 일정하중스크래치(스크래치 속도: 10m/s, 수직하중: 5mN)를 이용하여 단결정 실리콘표면에 가공한 그루브 (폭: 1.3 μ m, 높이: 14nm)를 20 wt. % KOH용액에서 15분간 식각시켜 철(convex)형 구조체 (폭: 1.3 μ m, 높이: 190nm)를 얻을 수 있었다. 또한, 식각 후 얻어진 철(convex)형 구조체의 폭은 그루브의 폭과 거의 일치하였으며, 종횡비 및 구조체의 표면상태가 크게 개선 되었음을 관찰 할 수 있었다.

(3) 폭과 높이가 각각 1.3 μ m 와 190nm인 실리콘 구조체를 스탬퍼로 이용하여 PDMS 레올로지 성형 공정을 수행한 결과, 폭과 깊이가 각각 1.6 μ m와 170nm인 PDMS 채널을 제작할 수 있었다. 대량전사공정으로의 적용 가능성은 확인할 수 있었으며, 추후 연구에서 전사성 향상에 관한 연구를 하고자 한다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업으로 진행된 결과로서 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Ph. Avouris, T. Hertel and R. Martel., 1997, "Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication," Appl. Phys. Lett., Vol. 2, pp. 285~287.
- (2) Sasa, S., Ikeda, T., Kajiuci, A., and Inoue, M., 1998, "AFM fabrication and characterization of InAs/AlGa

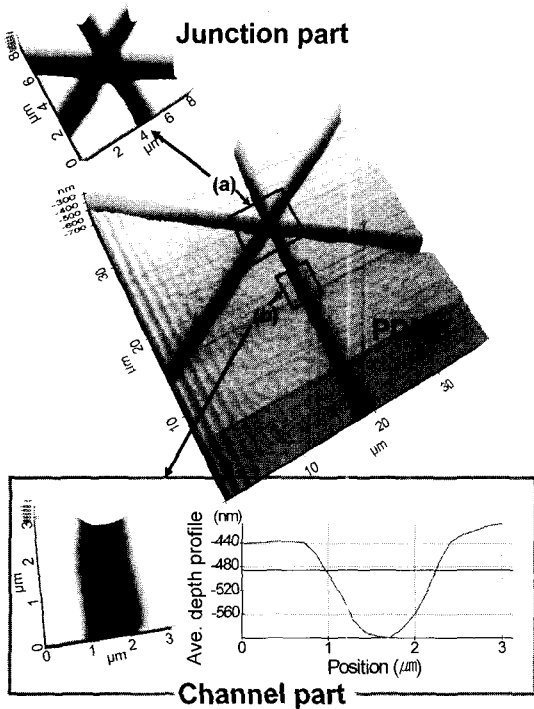


Fig. 10 AFM image of the PDMS channel fabricated by the PDMS casting process

제작된 실리콘 스탬퍼의 PDMS 성형공정으로의 응용가능성을 평가하기 위하여, Fig. 9의 시편을 스탬퍼로 이용하여 PDMS 성형실험을 수행하였다. Fig. 10은 실리콘 스탬퍼(Fig. 9)에 액체상태인 프리일래스토머를 부은 후, 상온에서 경화시켜 제작한 PDMS채널을 나타내고 있다. 육안으로는 시편에 기포가 관찰되지 않았으며, 양호한 표면상태가 관찰된다. Fig. 10(a)은 PDMS 채널의 교차부를 확대해서 나타낸 AFM사진이다. 예측할 수 있는 바와 같이, 실리콘 스탬퍼의 교차부에서 관찰되었던 표면기복이 관찰되었다. Fig. 10(b)는 PDMS 채널의 AFM 단면분석 결과를 나타내고 있다. 측정된 채널의 폭과 깊이는 각각 1.6 μ m와 170nm 였다.

PDMS의 전사성 향상을 위한 추가적인 연구가 필요하나, 대량전사공정용 스탬퍼로의 적용가능성은 확인할 수 있었다. 교차부를 가지는 PDMS 구조체 제작 기술은 패키징 기술 및 유체와 유로의 접촉 면적을 증가시키기 위한 구조 설계 연구가 병행된다면 유체혼합기(fluidic mixer) 제작에 응용될 수 있을 것이다.

- Sb nanostructures,” *Solid-State Electronics*, Vol. 42, No. 7-8, pp. 1069~1073.
- (3) B. Bhushan., 1999, “Nanoscale tribophysics and tribomechanics,” *Wear*, Vol. 225-229, pp. 465~492.
- (4) L. L. Sohn and R. L. Willet., 1995, “Fabrication of nanostructures using an atomic force microscope-based lithography,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, pp. 1552~1554.
- (5) P. M. Campell and E. S. Snow., 1999, “Proximal probe-based fabrication of nanometer-scale devices,” *Proc. SPIE-Intl. Soc. Optical Engr.*, 3975, pp. 943~948.
- (6) K. Ashida, L. Chen and N. Morita., 2001, “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. 2001, Turin, Italy, May*, pp. 78~81.
- (7) K. Ashida, N. Morita and Y. Shosida., 2001, “Study on nano-machining process using mechanism of a friction force microscope,” *JSME International Journal, Series C*, Vol. 44, No. 1, pp. 244~260.
- (8) N. Morita., 2001, “Micro-fabrication technique of single crystal silicon by using combination of nano-scale machining and alkaline etching,” *J. of the JSGE*, Vol. 45, No. 6, pp. 275~278.
- (9) S. Miyake and J. D. Kim., 2002, “Increase and decrease of etching rate of silicon due to diamond tip sliding by changing scanning density,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 41, pp. L1116~L1119.
- (10) S. Miyake and J. D. Kim., 2001, “Fabrication of silicon utilizing mechanochemical local oxidation by diamond tip sliding,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. L1247~L1249.
- (11) 장원석, 신보성, 황경현, 2003, “Nanoprobe 응용기술 동향,” *한국정밀공학학회지*, 제20권 제 3 호, pp. 5~14.
- (12) I. H. Sung, J. C. Yang, D. E. Kim and B. S. Shin., 2003, “Micro/nano-tribological characteristics of self-assembled monolayer and its application in nano-structure fabrication,” *Wear*, Vol. 255, pp. 808~818.
- (13) T. L. Lee, J. S. Oh, S. J. Park, K. O. Park, J. S. Ha, H. J. Yoo and J. Y. Koo., 1997, “Nanometer-scale lithography on H-passivated Si(100) by atomic force microscope in air,” *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. A 15, No. 3, pp. 1451~1453.
- (14) W. S. Blacley and R. O. Scattergood, 1990, “Crystal orientation dependence of machining damage – A Stress Model,” *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, No 10, p. 3113.
- (15) T. Shibata, S. Fuji, E. Makino and M. Ikeda., 1996, “Ductile-regime Turning Mechanism of Single-crystal Silicon,” *Jpn. Prec. Eng.*, Vol. 18, No 2/3, p. 130.
- (16) Y. J. Shin, J. D. Cho and E. S. Lee., 2003, “Trend of soft lithography technology,” *J. Kor. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 20, No. 4, pp. 5~11.
- (17) Zurich Research Lab., <http://www.zurich.ibm.com/st/microcontact/index.html>.
- (18) S. W. Youn and C. G. Kang., 2004, “Maskless pattern fabrication on Si(100) surface by using nanoindenter with KOH wet etching,” *Scripta mater.*, Vol. 50, pp. 105~109.
- (19) D. Mulliah, D. Christopher, S. D. Kenny and R. Smith., 2003, “Nanoscratching of silver (100) with a diamond tip,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 202, pp. 294~299.
- (20) Anthony C. Fischer-Cripps., 2002. “Nanointention (Mechanical engineering series), Springer-Verlag, pp. 71~74.