

미세탐침기반 기계-화학적 리소그래피공정에 의한 마이크로/나노패턴 제작

성인하*, 김대은**

Fabrication of Micro/Nano-patterns using MC-SPL (Mechano-Chemical Scanning Probe Lithography) Process

In-Ha Sung* and Dae-Eun Kim**

ABSTRACT

In this work, a new non-photolithographic micro-fabrication technique is presented. The motivation of this work is to overcome the demerits of the most commonly used photolithographic techniques. The micro-fabrication technique presented in this work is a two-step process which consists of mechanical scribing followed by chemical etching. This method has many advantages over other micro-fabrication techniques since it is simple, cost-effective, rapid, and flexible. Also, the technique can be used to obtain a metal structure which has sub-micrometer width patterns. In this paper, the concept of this method and its application to microsystem technology are described.

Key Words : Mechano-chemical process (기계-화학적 공정), Abrasive interaction (연삭 상호작용), Nano wear (극 미세마멸), Self-assembled monolayer (자기조립분자막)

1. 서론

현재 가장 많이 사용되고 있는 미세패턴 및 구조물 제작기술로서는 LIGA, 광학이나 고에너지 이온빔, X 선 등을 이용하는 포토리소그래피 기술^[1-4]을 들 수 있다. 이러한 포토리소그래피 기술들은 자외선, X 선, 레이저 등 광 시스템 및 aligner 등 시설에 대한 초기투자가 많이 들고, 공정특성상 다단계의 마스크공정과 에칭공정 등 복잡한 공정을 필요로 하며 제작시간이 많이 소요될 뿐만 아니라, 패턴변경 등 디자인변화를 위해서는 새로 마스크를 제작해야 하는 문제가 있어 단품종 대량

생산에는 적합하나 다품종 소량생산에는 불리하다. 또한, 가공가능한 재료가 대부분 실리콘 기반재료 (silicon-based material)에 한정되어 있다는 단점을 가진다. 더구나, 이러한 리소그래피 기술에 의해서 제작가능한 최소선폭의 물리적 한계가 예상되고 있어, 최근들어 초정밀 미세 절삭가공기술, 미세성형기술, 주사탐침현미경(SPM, Scanning Probe Microscope)을 이용한 나노패턴 형성 기술들이 다양하게 연구되어 오고있다.

미세 절삭가공기술의 연구는 주로 미세방전, 집중이온빔, 레이저 등을 이용한 미세 구조물 제작^[5,6]으로, 유연성이나 곡면가공성은 좋으나 높은

☞ 2002년 5월 27일 접수
* 연세대학교 대학원 기계공학과
** 연세대학교 기계공학부

가공에너지를 필요로 하며, 가공후 잔유물 생성 및 가공표면의 표면품질 저하 등의 문제가 있다. 미세 성형기술은 미세접촉인쇄(micro-contact printing), 미세주조/각인(micro-molding/imprinting)^[7-9] 등으로서, 폴리머나 금속에 이용가능하나 형상 치수의 정확성향상, 이형(release)공정시 형상변형 문제 등이 아직 해결해야 할 점이다. 주사전자 현미경을 이용한 미세가공기술^[10-13]은 저에너지 /저온 공정, 극미세 패턴 및 구조를 제작할 수 있는 장점이 있으나, 패턴형성이나 구조물제작을 위한 공정 속도가 매우 느리고, 재료의 한계 및 진공/ 전기장 등을 위한 부가설비가 필요하다. 이와 같이, 현재 연구개발중인 이러한 기술들은 아직은 대부분 연구실차원에서의 가능성 입증이나 개발상태에 머물러 있고 실제 현업에 적용하기에는 공정개발, 정밀도 향상 등 여러가지 해결해야 할 기술적 문제들이 많이 남아 있다.

이러한 배경으로부터, 본 연구팀에서는 기존의 기술들이 갖는 단점을 극복하고, 다양한 재료에 대해 적용가능한 신속하고 저렴하며 유연한 기계-화학적 마이크로/나노 구조물 제작 기술^[14-18]을 개발, 제안한바 있다. 기계-화학적 마이크로/나노 구조물 제작 기술의 기본개념은 Fig. 1 에 보이는 바와 같이 시료표면에 화학적 가공의 보호층 역할을 할 리지스트(resist)를 형성시킨 후 1 차적으로 이를 미세 팁(tip)을 이용, 팁에 힘을 가하여 팁-공작물 간 연삭 마멸 상호 작용(abrasive wear interaction)에 의해 직접 시료의 표면형상을 변형시키는 기계적 변형방법을 통해 제거한다. 이러한 방법은 현재 개발중인 여러 미세 구조물 제작기술 중에서 가장 설계변경이 수월하고 설비가 간단하며 속도면에서 빠르다는 장점이 있으나, 해결해야 할 문제로서 기계적 가공후 패턴주위에 남는 버(burr) 및 가공 또는 마멸된 시료잔유물을 들 수 있는데, 이로 인해 생성되는 패턴의 재현성이나 정밀도가 나빠지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 화학적 에칭에 의해 기계가공된 패턴 또는 영역만을 선택적으로 제거하여 원하는 형상을 얻는다.

이러한 방법을 이용하면 단순한 기계적변형 방법으로는 해결이 불가능한 가공잔유물을 제거할 수 있으며, 에칭시간 조절에 따라 고종횡비(high-aspect ratio)를 갖는 3 차원 미세구조물 제작이 가능하게 된다. 또한, 실리콘을 기반으로 하는 재료뿐만 아니라 다양한 금속재료에도 적용가능한 큰

잇점을 가진다. 이러한 방법으로 형성된 미세구조는 미세주형(micro-mold), 미세유체채널 (micro-fluidic channel) 등에 응용할 수 있다.

본 미세가공법은 단인(single asperity)공구로 배분력(thrust force)의 조절에 의해 공작물의 마멸을 제어하는 가공법으로서, 마찰 및 마멸현상을 재료의 품질저하나 지양해야 할 요소로 생각하지 않고 보다 적극적으로 미소가공에 응용할 수 있다는 가능성을 제시하는 새로운 개념의 미소가공법이다.

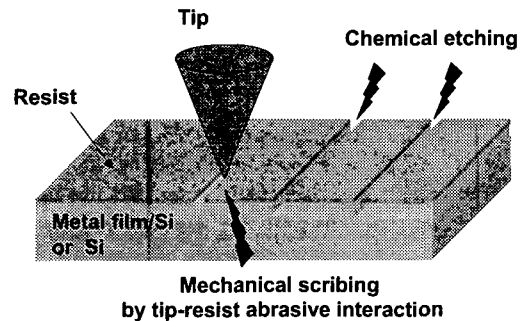


Fig. 1 Schematic diagram of mechano-chemical process

2. 가공방법 및 장치

2.1 실험장치

미세가공을 위해 자체제작한 미세패턴 가공기^[14]와 상용화된 주사탐침현미경을 이용 하였다.

미세패턴가공기는 공구로서는 단결정 다이아몬드 팁(반경: 5 μ m, 경도: 8000~10000 HV)을 사용하였고, 이송부로서 3 축 정밀 리니어 액츄에이터(이송 정밀도: 60nm, 최대이송거리: 25mm)가 장착된 마이크로이송대(micro-stage)를 이용하였다. 가공시에 팁에 의해 시편에 가해지는 배분력을 정밀하게 측정할 수 있도록 정밀저울로 구성하였다. 정밀저울 위에 고정된 공작물에 대해 3 축 액츄에이터에 의해 공구가 상대 운동하여 재료제거를 유발, 미소가공이 이루어진다. 패턴의 가공경로는 프로그래밍을 통하여 원하는 대로 쉽게 변경할 수 있다. 또한, 정밀저울로부터 감지되는 하중을 피드백시켜 가공이 진행되는 동안 원하는 값으로 하중을 제어, 유지하였다.

이와함께 더욱 미세한 패턴 및 구조물 제작의 가능성을 보기 위하여 주사탐침현미경을 이용하였

는데, 기계적가공을 위해 다이아몬드 팁(반경: ~150nm)이 부착된 캔틸레버를 사용하였다.

2.2 시편/리지스트(resist)

시편으로는 Si(100) 및 Si(100) 위에 전자빔증착(E-beam evaporation) 또는 스퍼터링(RF-sputtering)으로 박막증착한 Cu, Au 금속시편들을 사용하였다. 증착두께는 각각 약 180, 250nm 이다.

리지스트로서는 실리콘의 경우, 선행연구를 통해 폴리머, 금속, 세라믹 등 다양한 재료를 검토한 결과, 패턴의 형상 및 정밀도측면에서 SiO₂가 가장 적합하였으므로^[14], 가열성장시킨 SiO₂(두께 : 80nm)를 사용하였다. 한편 금속박막을 위한 리지스트로는 자기조립분자막(SAM, Self-Assembled Monolayer)의 일종인 HDT(HS(CH₂)₁₅CH₃, hexadecanethiol)-SAM을 기존의 연구들을 통해 알려진 프로세스를 참조하여^[19,20] 증착하여 사용하였는데, 자기조립분자막을 리지스트로 사용한 이유는 리지스트 두께가 얇을수록 미세한 선폭가공이 가능하기 때문이다. 또한, 탄화수소사슬이 길수록 자기조립분자막의 defect가 작을 가능성이 높아져 에칭리지스트로서 우수한 특성을 나타낼 수 있으므로 15 개의 긴 사슬을 갖는 HDT(hexadecanethiol)을 사용하였다. 자기조립분자막의 두께는 담금시간(dipping time)에 따라 다소 달라지는데, 본 연구에서는 약 5-6nm 두께로 증착하여 사용하였다.

2.3 화학적 에칭

기계적 가공으로 리지스트가 제거된 부분에 대해서 원하는 패턴을 얻기위해 앞서 언급한대로 화학적 에칭이 수행된다. 에칭은 습식에칭으로 수행되었는데, 리지스트는 거의 에칭하지 않으면서 모재에만 반응하는 에칭 선택성(etching selectivity)이 중요하다. 에칭액으로는 실리콘에 대해서는 이방성에칭액으로 일반적으로 많이 사용되는 KOH(potassium hydroxide)를 사용하였다^[14].

금속의 경우는 본 연구에서는 Cu에 대해서는 FeCl₃(Iron(III) chloride)를, Au에 대해서는 KCN/KOH 용액을 사용하여 에칭하였다. 이러한 에칭액에 의해서 thiol-SAM으로 보호된 영역은 thiol이 제거된 부분에 비해 10⁶ 배 느리게 에칭되는 것으로 알려져있다^[21].

3. 결과 및 토의

Fig. 2는 Si(100)표면에 5 μm 간격으로 제작된 마이크로 패턴의 이미지이다. 반경 5 μm의 팁으로 약 2~2.5 μm의 선폭을 갖는 패턴이 제작되었음을 알 수 있다. 기계가공시의 하중은 40mN으로 하였다. 또한 팁의 이송량 및 공구경로를 조절함으로써 패턴뿐만 아니라 다양한 형태의 면적가공도 용이하게 이루어질 수 있다^[14,15].

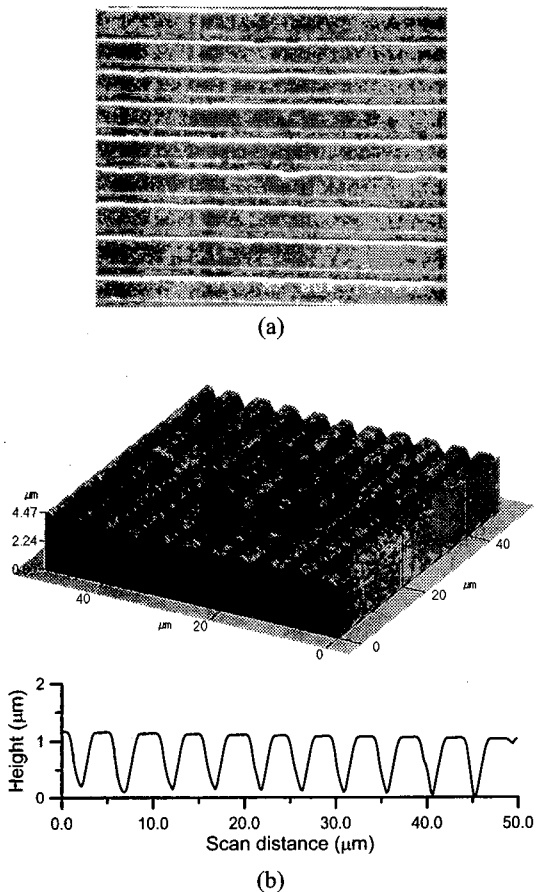


Fig. 2 Micro-patterns on Si(100) surface (a) SEM image (b) AFM image and cross-sectional profile

한편 금속재료의 경우는, 본 연구의 선행연구^[14,15]에서는 금속모재를 갈림현상(plowing)을 이용하여 직접 가공한 후 디버링(deburring) 하는 프로세스를 이용하였다. 그러나, 이러한 방법으로는 좋

은 표면품위를 얻을 수 없는 단점을 지닌다. 이러한 단점을 극복하기 위해서, 금속위에 유기박막인 자기조립분자막을 증착하여 이를 리지스트로 사용하는 개념을 도입하였다. 즉, 기계적 가공으로 자기조립분자막을 제거한후 에칭으로 금속을 원하는 깊이만큼 제거한후 자기조립분자막을 화학적처리로 제거해내는 것이다. 본 연구에서 사용한 thiol-SAM 의 경우, 다이아몬드 팁으로 수 nN 의 극저하중에 의해 제거되면서도, 화학적 에칭과정에서 금속 에칭액에 대해 리지스트로서의 역할을 잘 수행하는 것으로 확인되었다.

Fig. 3 은 HDT-SAM 이 코팅된 Au 표면을 주사 탐침현미경을 이용하여 기계-화학적방법으로 가공한 외부 40 x 40(μm), 내부 10 x 10 (μm) 크기의 이중포켓이다. 내부의 사각형상은 실리콘을 후방식각(back-etch)으로 분리해내면 금속 미세관(micro-duct)으로 활용할 수 있을 것이다.

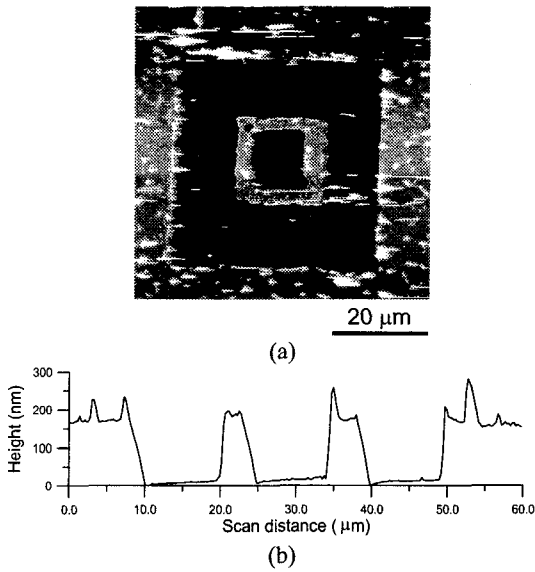


Fig. 3 AFM images of machined pocket on HDT-SAM coated Au/Si(100) surface

또한, Fig. 4 는 HDT-SAM 이 코팅된 Cu 표면 위에 1 μm 간격으로 반복되는 선폭 약 300-350nm 의 나노패턴을 제작한 것이고, Fig. 5 는 간격 4 μm, 높이 약 200 nm 로 격자(grating) 표면을 제작한 것이다. 이러한 형상들은 마이크로/나노 구조물을 위

한 미세주형(mold)으로도 응용될 수 있으리라 생각된다. 또한, 먼지 등 오염에 대해 보다 잘 제어된 환경에서 더 미세한 팁을 사용한다면 선폭 및 패턴의 표면품위를 더욱 향상시킬수 있을 것으로 기대된다.

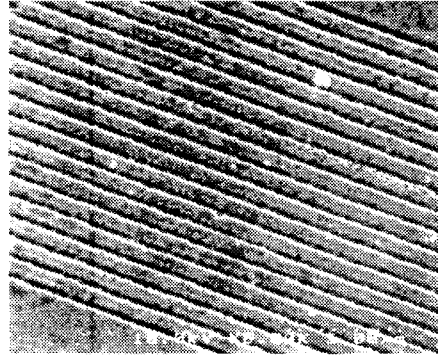


Fig. 4 SEM image of nano-grooves on HDT-SAM coated Cu/Si(100) surface (1 μm spacing)

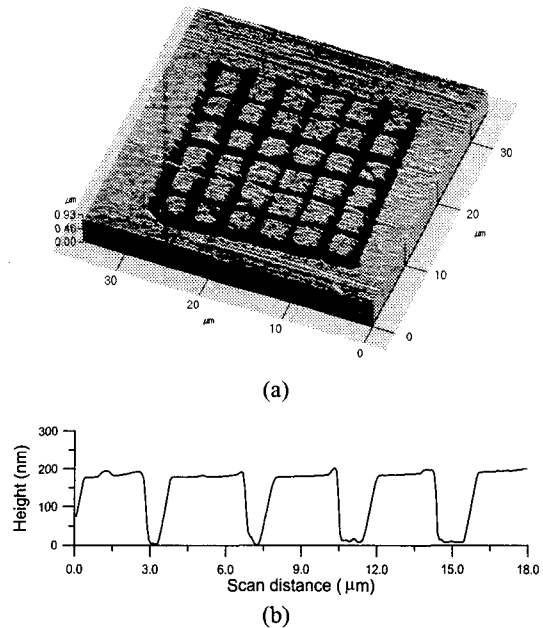


Fig. 5 AFM images of micro-grating on HDT-SAM coated Cu/Si(100) surface (4 μm spacing)

4. 결론

본 연구에서는 팁과 가공하고자 하는 재료간의 상대접촉운동에 대한 마찰 및 마멸의 기초적인 이해를 바탕으로, 기존의 미세가공법이 가지는 단점을 극복하면서 실리콘기반재료(silicon-based material) 뿐만 아니라 금속재료에도 적용할 수 있는 경제적이고 유연한 새로운 개념의 미소가공기술을 제안하고, 그 가능성과 유용성을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 새로운 미세가공기술을 이용하면 프로그래밍에 의해 공구경로만을 변화시켜 줌으로써 손쉽게 다양한 형상의 미세요철표면, 미소금형 등을 제작할 수 있으며, 주사탐침원자현미경(AFM)을 이용한 나노리소그래피 기술로도 활용할 수 있다. 지금까지의 미소가공 기술에서는 재료에 제한이 있고 디자인을 변화시킬 때 마스크를 다시 제작해야 하고, 새롭게 공정을 수행하는데 비용과 시간이 많이 드는 점을 생각해 볼때, 본 미소가공 기술은 디자인의 변화가 쉽기 때문에 공정 시간을 단축시킬 수 있고 경제적이므로 매우 유용한 기술이라고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프론티어 연구 개발사업인 지능형 마이크로시스템 개발사업(<http://www.microsystem.re.kr>)의 연구비지원을 받아 수행하였음 ; 과제협약번호 MS-02-342-01.

참고문헌

- Romankiw, L. T., "A Path: From Electroplating through Lithographic Masks in Electronics to LIGA in MEMS," *Electrochim. Acta*, Vol. 42, pp. 2985-3005, 1997.
- Menz, W., "LIGA and Related Technologies for Industrial Application," *Sensor. Actuat. A-Phys.*, Vol. 54, pp. 785-789, 1996.
- Qin, D., Xia, Y., Rogers, J. A., Jackman, R. J., Zhao, X. M., Whitesides, G. M., "Micro-fabrication, Microstructures and Microsystems," *Top. Curr. Chem.*, Vol. 194, pp. 1-20, 1998.
- Rogner, A., Eicher, J., Munchmeyer, D., Peters, R. P., Mohr, J., "The LIGA Technique-What are the new opportunities," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 2, pp. 133-140, 1992.
- McKeown, P. A., "The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future," *Ann. CIRP*, Vol. 36, pp. 495-501, 1987.
- Taniguchi, N., *Nanotechnology*, Oxford University Press, New York, 1996.
- Xia, Y., Whitesides G. M., "Soft Lithography," *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 37, pp. 550-575, 1998.
- H. Schiff, R. W. Jaszewski, C. David and J. Gobrecht, "Nanostructuring of polymers and fabrication of interdigitated electrodes by Hot Embossing Lithography," *Microelectron. Eng.*, Vol. 46, pp. 121-124, 1999.
- Gottschalch, F., Hoffmann, T., Torres, C. M. S., Schulz, H., and Scheer, H.-C., "Polymer issues in nanoimprinting technique," *Solid State Electron.*, Vol. 43, pp. 1079-1083, 1999.
- Snow, E. S., Campbell, P. M., "Fabrication of Si nanostructures with an atomic force microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 1932-1934, 1994.
- Minne, S. C., Adams, J. D., Yaralioglu, G., Manalis, S. R., Atalar, A., Quate, C. F., "Centimeter scale atomic force microscope imaging and lithography," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, pp. 1742-1744, 1998.
- Marran, C. R. K., Perkins, F. K., Brandow, S. L., Koloski, T. S., Dobisz, E. A., Calvert, J. M., "Low voltage electron beam lithography in self-assembled ultrathin films with the scanning tunneling microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 390-392, 1994.
- Ivanisevic, A., Mirkin, C. A., "Dip-Pen Nanolithography on Semiconductor Surfaces," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 123, pp. 7887-7889, 2001.
- Lee, J. M., Jin, W. H., Kim, D. E., "Application of Single Asperity Abrasion Process for Surface Micro-machining," *Wear*, Vol. 251, pp. 1133-1143, 2001.
- Lee, J. M., Sung, I. H., Kim, D. E., "Process Development of Precision Surface Micro-machining using Mechanical Abrasion and Chemical Etching," *Microsyst. Technol.*, In press, 2002.
- Kim, D. E., Yi, J. J., "Micro-patterning of Silicon by Frictional Interaction and Chemical Reaction," *J. Tribol.-T. ASME*, Vol. 120, No. 2, pp. 353-357, 1998.

17. 진원혁, 김대은, “마스크에 대한 기계적 가공을 이용한 단결정 실리콘의 미세 패턴 가공,” 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 2 호, pp. 60-67, 1999.
18. 이재준, 김대은, “기계 및 화학적 가공법을 이용한 신 미세가공기술,” 대한기계학회논문집 (A), 제 20 권, 제 10 호, pp. 3113-3125, 1996.
19. Xia, Y., Zhao, X.-M., Whitesides, G. M., “Pattern transfer : Self-assembled monolayers as ultrathin resists,” *Microelectron. Eng.*, Vol. 32, pp. 255-268, 1996.
20. Cha, K. H., Kim, D. E., “Investigation of the tribological behavior of octadecyltrichlorosilane deposited on silicon,” *Wear*, Vol. 251, pp. 1169-1176, 2001.
21. Biebuyck, H. A., Larsen, N. B., Delamarche, E., and Michel, B., “Lithography beyond light: Microcontact printing with monolayer resists,” *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 41, No. 1-2, pp.159-170, 1997.