

펨토초 레이저의 근접장 효과를 이용한 미세가공 Sub-micro machining by using near field effect of femto-second laser

김 진범*, 나 석주**

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

NSOM(Near-field Scanning Optical Microscope)과 레이저를 이용한 가공 시스템은 근접장 효과를 이용하여 광원의 회절한계보다 작은 나노크기 수준의 점이나 선등의 패턴을 제작하기 위한 공정에 응용되고 있다. 이러한 가공 시스템은 결정질 실리콘의 광화학 식각(photo-chemical etching)에 응용될 수 있고,⁽¹⁾ 공액고분자(conjugate polymer)를 대상으로 광부가 조형 공정(photo-additive structuring process)에 응용될 수 있으며,⁽²⁾ 자기조립 단분자막(Self-Assembled Monolayers: SAMs)등의 물질에 대한 제거공정에 응용될 수 있다.⁽³⁾ 또한 이는 물질의 광학적 특성을 나노 크기의 영역에서만 변화를 유도할 수도 있다.^{(4),(5)} 이처럼 NSOM과 레이저를 이용한 나노공정은 다양한 물질과 공정에 적용할 수 있다는 장점을 지닌다. 본 연구에서는 NSOM과 펨토초 레이저, 그리고 티올분자의 자기조립박막을 이용하여 미세표면형상을 가공하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 미세패턴 제작 공정 및 결과

미세표면형상 가공을 위한 실험장치의 모식도를 그림 1에 나타내었다. 펨토초 레이저는 대물렌즈를 통해서 NSOM 프로브에 집속되고 NSOM은 튜닝포크(tuning fork)에 의해서 가공 표면과 프로브 끝 사이의 거리를 100nm 이내로 유지한다. 프로브에 펨토초 레이저를 집속시키기 위해서 프로브의 아래쪽과 위쪽에 CCD 카메라를 설치하여 집속되는 과정을 관찰하였다. 가공물질은 2축 피에조-스테이지(piezo-stage)에 의해 이송되며, 가공빔의 편광방향에 따른 가공 특성을 파악하기 위하여 펨토초 레이저와 대물렌즈 사이에 반파장판(half-wave plate)과 편광빔 분할기(polarization beam splitter)를 설치하였다.

실험에 사용할 시편은 기판이 될 실리콘 웨이퍼에 스퍼터링(sputtering)을 통하여 금박막을 형성한 후 금박막층 위에 잔류하는 유기물 등을 제거하기 위해 황산(H₂SO₄)과 과산화수소(H₂O₂)를 약 3:1의 비율로 섞은 피라냐용액(pirahna solution)에 담근 후에 증류수로 다시 세척하고 질소가스로 건조시킨다. 이렇게 준비된 시편을 티올중 탄소사슬의 수가 18개인 octadecanethiol (CH₃(CH₂)₁₇SH)의 농도가 약 2mM정도가 되도록 에탄올과 섞은 용액에 1일 이상 담그면 시편의 표면에 단분자막이 형성된다.⁽⁶⁾ 그림 2에 자기조립 단분자막의 형성과정을 도식적으로 나타내었다.

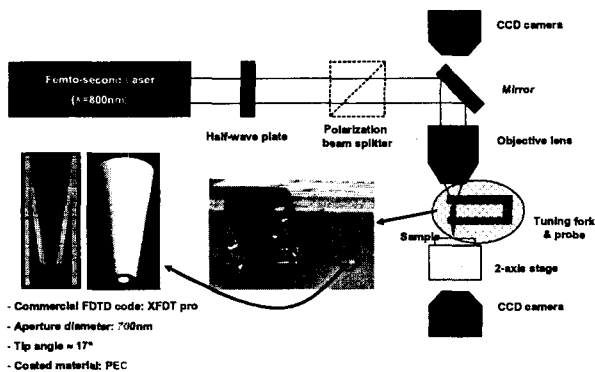


Fig 1 Schematic experimental setup of nano-scale pattern fabrication and simulation model of NSOM probe.

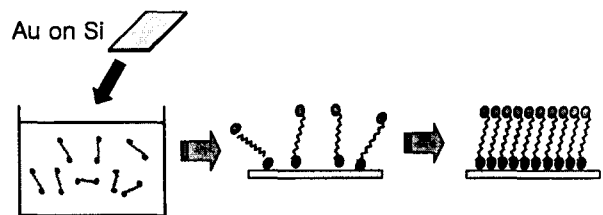


Fig 2 Schematic diagram of self-assembled monolayers

위의 과정에 의해서 준비된 시편에 펨토초 레이저가 집속된 NSOM 프로브를 100nm 이내로 접근시키면 프로브의 개구부 크기로 빛의 크기가 제한되어 빛의 회절한계보다 작은 크기로 SAMs를 가공하는 것이 가능해진다. 본 연구에서는 개구부 직경이 700nm인 프로브를 사용하였다. 앞서 설명한 바와 같이 가공빔의 편광방향에 따른 가공특성을 알아보기 위하여 시편의 이송 방향과 가공빔의 편광 방향이 서로 수직인 경우와 서로

수평인 경우로 실험조건을 바꾸어 가공을 수행하였다. SAMs를 가공한 후에 시편을 식각용액(etchant)에 20분간 담갔다. 식각후 시편의 표면을 관찰결과 SAMs가 가공되지 않은 부분의 금박막층은 SAMs에 의해서 식각용액으로부터 보호되었으나 펨토초 레이저에 의해서 SAMs가 가공된 부분은 식각용액에 의해서 금박막층에 패턴이 만들어졌음을 관찰할 수 있었다. 그림 3은 기술된 방법에 의해서 가공된 시편을 AFM으로 측정된 결과다. 그림 3-(a)는 이송방향과 편광방향이 서로 평행한 경우이며, 그림 3-(b)는 서로 수직인 경우이다. 각각의 경우 모두 선폭이 약 400-500nm인 선형패턴이 제작되었다. 제작된 선형패턴 외에도 시편의 표면에 여러 개의 미세한 선형패턴들이 규칙적으로 형성된 것이 발견되었으면 이는 프로브에 의해서 시편이 긁혀서 만들어진 것으로 사료된다.

3. 해석방법 및 결과

NSOM 프로브 근접장에서의 전자기장 분포해석은 나노크기 수준의 전자기장 분포해석의 도구로 널리 사용되고 연구되고 있는 FDTD(Finite Difference Time Domain) 알고리즘에 기반을 둔 상용코드인 XFDTD-pro를 사용하여 3차원의 형상에 대해서 수행하였다. 해석모델의 물리적인 타당성은 H. A. Bethe⁽⁷⁾에 의해 제안되고 C. J. Boukamp^{(8),(9)} 등에 의해서 수정되었던 작은 구경에 대한 회절이론과 해석결과와의 비교를 통해서 타당성을 검증하였다.⁽¹⁰⁾

NSOM 프로브 근접장에서의 전자기장 분포해석을 위하여 다음과 같이 모델링 하였다. 프로브의 끝각은 17°, 개구부의 직경은 700nm로 본 연구의 실험에서 사용된 프로브의 형상에 기초하여 선정하였으며, 입력파는 선평광된 파장 800nm의 빛으로 역시 본 연구에서 사용된 레이저의 파장과 같은 파장을 선정하였다. 그림 1에 본 연구에서 사용한 프로브의 모델이 제시되어 있다. 그림 4는 그림 1의 모델에 대해서 수행한 해석의 결과이다. 그림 4-(a)는 입사된 빛의 편광방향과 이송방향이 서로 수직인 경우에 대해서, 그림 4-(b)는 입사된 전기장의 편광방향과 이송방향이 서로 평행한 방향에 대한 해석결과를 도시한 것이다. 두개의 결과 모두 프로브 끝으로부터 멀어질수록 전기장의 분포가 약해지고 점점 퍼지는

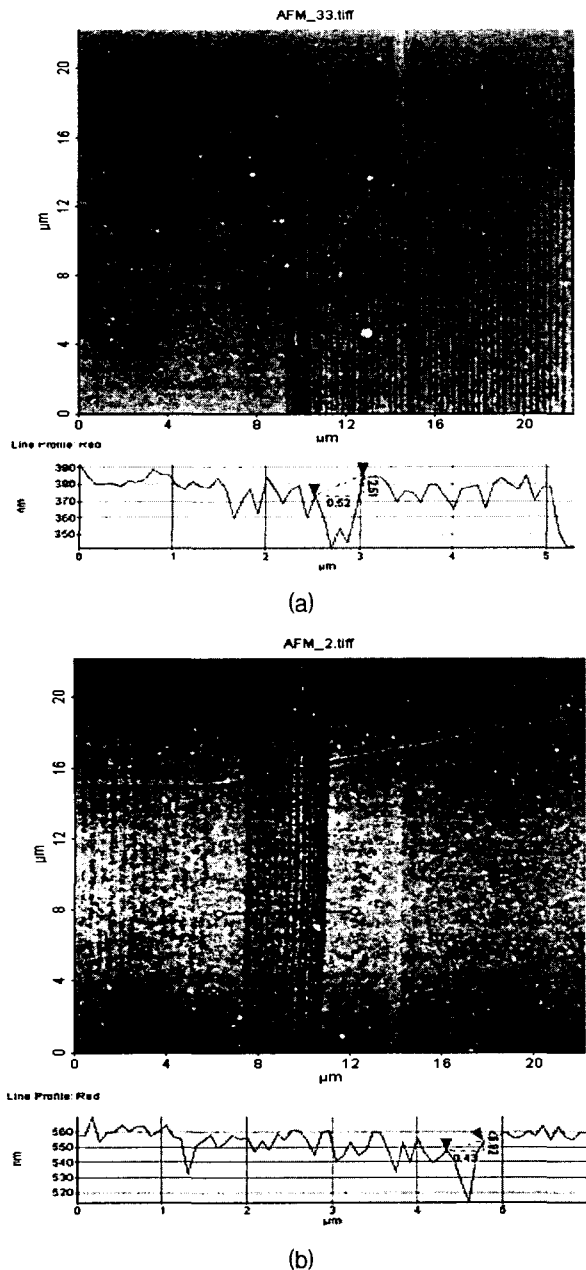


Fig 3 AFM images of line pattern (a) polarization direction parallel to the scanning direction (b) polarization direction perpendicular to the scanning direction

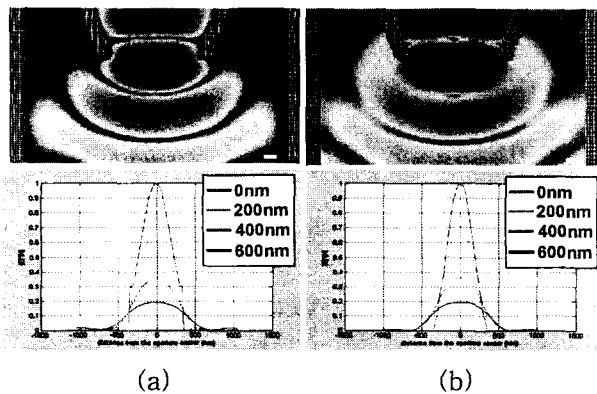


Fig 4 Simulation results: Electrical field distribution with respect to the polarization direction (a) polarization direction parallel to the scanning direction (b) polarization direction perpendicular to the scanning direction

것을 확인할 수가 있으며 편광방향에 따라서 전기장의 분포가 크게 달라지는 않는 것을 볼 수가 있다. 그림 4의 아래쪽에 있는 그림들에서는 프로브 끝에서 떨어진 거리에 따른 전기장의 분포를 나타내고 있다. x축은 프로브 중앙에서부터의 거리를 나타내며, 프로브 끝에서부터의 거리는 그래프의 색깔로 표시하였다. 해석의 결과에서 프로브 끝에서부터의 거리가 0인 일 때에는 입사빔의 편광방향과 가공방향이 평행인 경우가 수직인 경우보다 FWHM에서 대략 15%정도 크게 나타났으나, 거리가 200nm로 늘어났을 경우는 4%정도의 차이를 보여 실제 가공할 시에는 편광방향에 따른 가공형상의 차이가 미미할 것으로 예상할 수 있다. 프로브 끝에서 떨어진 거리가 0일 때, FWHM은 입사빔의 편광방향과 가공방향이 평행인 경우 484nm, 수직인 경우가 406nm이었으며, 거리가 200nm일 때에는, 입사빔의 편광방향과 가공방향이 평행인 경우 508nm, 수직인 경우가 467nm이었다. 이러한 해석결과는 실험의 결과를 AFM으로 측정된 결과와(그림 3)와 잘 부합한다.

4. 결 론

본 연구에서는 NSOM과 펄스 레이저, 그리고 티올분자의 자기조립박막을 이용하여 450-500nm의 선폭을 갖는 선형패턴을 제작하였고, FDTD 알고리즘을 이용한 해석을 통해서 NSOM프로브 근접장에서의 전자기장 분포를 해석하고 실험결과와 비교 분석하여 해석결과의 타

당성을 보였다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어연구개발 사업인 나노메카트로닉스기술개발사업단의 연구비 지원(M102KN010001-02K1401-00710)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. G. Wysocki, J. Heitz, and D. Bäuerle : Near-field optical nanopatterning of crystalline silicon, *Applied Physics Letters* 84-12 (2004) 2025-2027
2. R. Riehn, A. Charas, J. Morgado, and F. Cacialli : Near-field optical lithography of a conjugate polymer, *Applied Physics Letters* 82-4 (2003) 526-528
3. S. Sun, and G. J. Leggett : Generation of nanostructures by scanning near-field photolithography of self-assembled monolayers and wet chemical etching, *Nano Letters* 2-11 (2002) 1223-1227
4. A. Naber, T. Dziomba, U. C. Fischer, H.-J. Mass, and H. Fuchs : Photopatterning of a monomolecular dye film by means of scanning near-field optical microscopy, *Applied Physics A* 70 (2000) 227-230
5. S. Takahashi, K. Samata, H. Muta, S. Machida, and K. Horie : Refractive-index patterning near-field scanning optical microscopy, *Applied Physics Letters* 78-1 (2001) 13-15
6. 최무진, 장원석, 김재구, 신보성 : 레이저 포토패터닝을 이용한 이중 자기조립 단분자막 형성기술, 한국정밀공학회 2003년 추계학술대회
7. H. A. Bethe : Theory of diffraction by small holes, *Physical Review* 66 (1944) 163-182
8. C. J. Bouwkamp : On Bethe's theory of diffraction by small holes, *Philips research reports* 5-5 (1950) 321-332
9. C. J. Bouwkamp : On the diffraction of electromagnetic waves by small circular disks and holes, *Philips research reports* 5-6 (1950) 401-422
10. 김진범, 나석주, 장원석, 김재구, 최무진 : 나노프로브에서의 전기장 분포에 관한 연구, 대한기계학회 2003년도 생산 및 설계공학부문 학술대회 논문집 (2003) 110-113