

펄스 부가 AFM을 이용한 나노 패터닝 Nanopatterning with Pulse Applied AFM

*김형철¹, 유종선¹, #류시형¹

*H. C. Kim¹, J. S. Yu¹, #S. H. Ryu(ryu5449@chonbuk.ac.kr)¹

¹전북대학교 기계공학과

Key words : Atomic Force Microscope, Nanopatterning, GaAs, Pulse Voltage, Nano-dot, Nano-pit

1. 서론

정보 기술, 생명공학 기술, 에너지 기술, 환경 기술, 우주 기술 등 차세대 주요 기술들이 발전하기 위해서는 나노 기술과의 융합이 필수적이다.¹ 나노 기술 분야에서 가장 원천 기술은 다양한 재료를 이용하여 원하는 형상을 용이하게 만들어 내는 나노 제조 기술이라 할 수 있다. 현재 산업적으로 가장 광범위하게 사용되는 나노 제조 기술은 광학 리소그래피 또는 이를 응용한 기술이다. 반도체 공정 기술에 의한 선평의 한계가 대두되고, 다루는 재료나 가공 형상의 다양성, 고비용 장치 산업으로 부터의 탈피 등이 요구되어 다양한 나노 제조 기술이 등장하였으며, 나노 임프린팅(nano-imprinting), 소프트 리소그래피(soft-lithography), 딥 펜(dip pen), 전자인쇄, 나노 스텐실(nano-stencil), AAO(anodic aluminum oxidation), 전자 또는 이온 빔 가공, 초단파 레이저 빔 가공, 미세 전해 및 방전 가공 등의 기술들이 널리 연구되고 있다. 최근들어 SPM(scanning probe microscope)을 이용한 나노 점, 선 가공 기술이 차세대 정보 저장 장치, 단전자 트랜지스터, LED, 레이저 등 광소자 제조에 유용하게 쓰일 수 있다는 점에서 주목을 받고 있다.² SPM을 이용한 나노 패터닝 기술은 기계적인 접촉을 통한 인텐데이션이나 스크라이빙, 산화 나노리소그래피(oxidation nanolithography) 또는, 여기에 화학적 에칭이나 레이저 빔을 부가하는 방법 등이 연구되고 있다. Yan³, Degiampietro⁴ 등은 다이아몬드 팁을 이용하여 구리나 스테인레스 스틸에 기계적인 방법으로 나노 스크래치 가공을 수행하였으며, 가압력, 가공속도와 가공깊이 등의 상관성을 조사하였다. Legrand⁵는 캔틸레버의 주파수와 인가 펄스의 위상차에 따른 Si의 산화 특성을 연구하였으며, Fukuzawa⁶, Nagahara⁷ 등은 Si, GaAs를 산화시킨 후 HF 에칭을 통하여 나노 그루브를 제작하는 방안을 제시하였다. 본 연구에서는 AFM의 프로브와 GaAs 기판 사이에 초단펄스를 부가하여 나노 dot, pit 등을 패터닝하는 방법에 대해 고찰하였다.

2. 실험 장치 구성

본 연구를 위하여 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. NT-MDT사의 원자현미경(atomic force microscope, Solver P47H-PRO)에 고주파 펄스 제너레이터(HP 8116A)를 연결하여 프로브와 기판 사이에 펄스 전압을 인가할 수 있도록 하였으며, Tektronix 사의 오실로스코프를 이용하여 인가 전압을 모니터링 하였다.

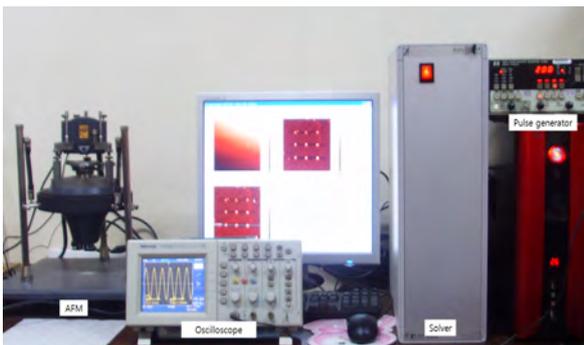


Fig. 1 Pulse applied AFM system

기판은 p-GaAs (100) 이며, 도전성을 갖도록 질소가 도핑된 다이아몬드 코팅 Si 프로브를 사용하였고, 실험은 컨택 모드에서 진행하였다. 캔틸레버의 스프링 상수는 11.5 N/m 이며, 프로브의 반경은 약 60 nm, 원추각은 22° 이하이다. Fig. 2에서 보듯이, AFM의 컨트롤러와 펄스 발생기를 동기화 시켜 펄스 발생기에서 생성된 펄스가 Solver를 지나 GaAs 기판에 인가되도록 시스템을 구성하였다.

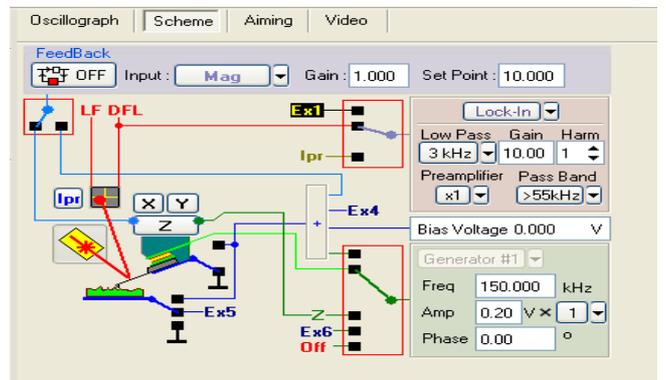


Fig. 2 External pulse input on the substrate

3. 실험 방법 및 결과

GaAs 기판에 산화 나노리소그래피를 이용하여 나노 dot을 형성하는 실험을 수행하였다. Fig. 3은 최소 전압 -4V, 최대 전압 4V, Set point 2 nA 의 조건에서 1 MHz 구형파를 5초간 인가했을 때 기판에 형성된 나노 dot의 형상을 보여주고 있다. 나노 dot의 폭은 약 300 nm 이며 높이는 8.5 nm 로 비교적 균일하였다. 이는 AC 펄스를 이용하면 음의 전압이 인가되는 동안 표면에 충전된 전하가 흩어져 DC 전압을 인가할 때 비해 생성되는 나노 dot의 폭이 줄고 높이가 증가한다는 기존 연구와 유사한 결과로 볼 수 있다.⁸

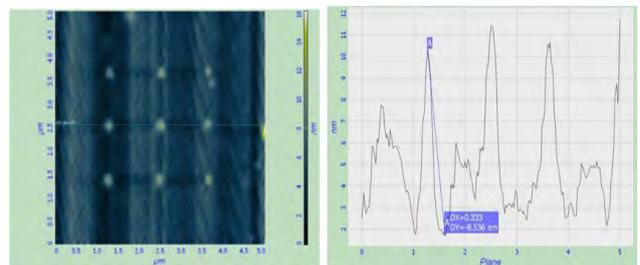


Fig. 3 Nano-dot generated by oxidation nanolithography

Fig. 4는 최소 전압 -4V, 최대 전압 4V, Set point 10 nA 의 조건에서 10 MHz 사인파를 5초간 인가했을 때 기판에 형성된 나노 pit의 형상을 나타낸다. Set point 즉 프로브가 기판에 가하는 가압력이 증가함에 따라 기판의 산화 현상이 억제되고 기계적인 압입 효과가 커지는 것으로 파악할 수 있다. Fig. 5는 생성된 나노 pit의 깊이를 측정한 결과로서 평균 깊이는 2.5 nm, 폭은 95 nm 이다. 여러 차례의 실험 결과 나노 pit의 크기와 깊이는 인가 전압의 크기와 펄스 주파수가 커질수록 다소 증가하는 것으로 나타났으나, 실험 결과의 재현성이 부족하여 단정하기에

는 어려움이 있다. Set point가 나노 pit의 형성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전압을 인가하지 않은 상태에서 set point를 15 nA 로 하고 나노 pit 생성 실험을 수행하였다. 실험 결과 0.3 nm 정도의 미세한 나노 pit이 생성되어 기계적인 나노 인덴테이션에 의해 GaAs를 패터닝하기는 어려운 것으로 파악된다. 실제로 기계적인 방법에 의한 나노 패터닝은 대부분 경도가 약한 폴리머 계열에 적용되는 방법이다.

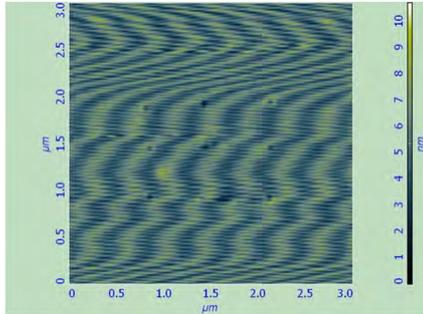


Fig. 4 Nano-pit generated under high set point and high frequency pulse modulation

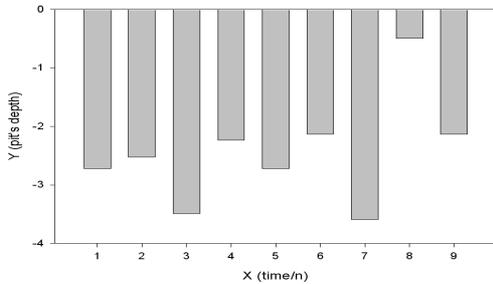


Fig. 5 Nano-pit depth variation

따라서, 실험 결과를 종합해 볼 때 펄스 전압하에서 GaAs의 표면이 연화되고, 연화된 표면을 프로브가 압입하여 나노 pit이 생성되는 것으로 유추해 볼 수 있다. 또는, 프로브와 기판 사이에 형성되는 물 브릿지(water meniscus)가 전해질로 작용하여 GaAs 표면을 화학적으로 취약하게 한 상태에서 기계적인 압입에 의해 나노 pit이 만들어 지는 것을 생각해 볼 수 있다. 나노 방전 현상에 의한 가공의 경우도 상정해 볼 수 있지만, Fig. 6에서 보듯이 가공 후의 프로브 팁의 형상이 가공 이전과 크게 다르지 않다는 점을 볼 때 가능성은 높지 않다고 판단된다.⁹

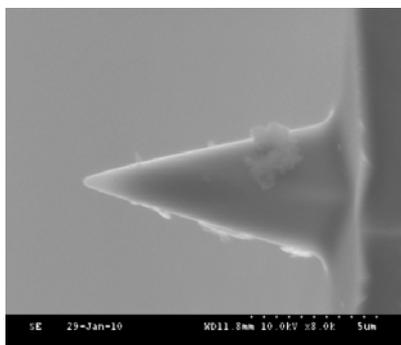


Fig. 6 AFM probe after machining

프로브에 의한 가압력의 크기는 아래의 식과 Fig. 7 그래프에서 보듯이 초기 set point에서 프로브를 후퇴시킬 때 움직이는 높이로부터 계산할 수 있다.

$$F = k \times \Delta \text{Height}$$

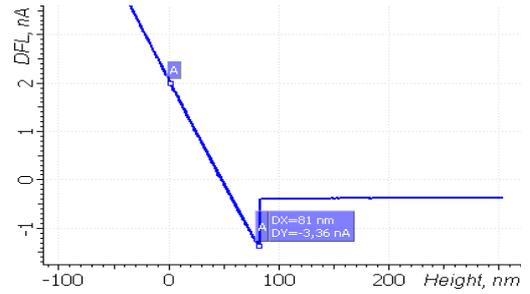


Fig. 7 Probe withdraw curve

4. 결론

AFM 프로브와 GaAs 기판 사이에 고주파 펄스를 추가하여 나노 dot과 나노 pit을 형성하였다. Set point 값이 작을 경우에는 산화 나노리쓰그래피에 의해 나노 dot이 형성되었으며, AC 4V, 10 MHz, 10 nA 의 set point에서 깊이 2.5 nm, 폭 100 nm 이하의 나노 pit이 생성되었다. 이는 펄스 전기장 하에서 GaAs 표면이 열적 또는 화학적으로 약화된 상태에서 프로브의 기계적 압입에 의해 나노 pit이 형성된 것으로 파악할 수 있다. 가공 후 프로브 상태가 가공 이전과 큰 차이가 없어 이와 같은 방법으로 다수의 나노 패턴을 용이하게 형성할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 펄스의 크기와 펄스 지속 및 인가 시간, 펄스 주파수와 가압력이 나노 dot이나 나노 pit의 형성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 가공 메커니즘을 규명하는 연구를 진행할 예정이다.

후기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0071106).

참고문헌

1. J. Corbett, P. A. McKeown, G. N. Peggs, and R. Whatmore, "Nanotechnology: International Developments and Emerging Products," CIRP Annals, 49, 523-545, 2000.
2. S. Luscher, A. Fuhrer, R. Held, T. Heinzel, K. Ensslin, and W. Wegscheider, "In-plane Gate Single-electron Transistor in Ga[Al]As Fabricated by Scanning Probe Lithography," Applied Physics Letters, 75, 2452-2454, 1999.
3. Y. Yan, T. Sun, Y. Liang, and S. Dong, "Investigation on AFM-based Micro/nano-CNC Machining System," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 1651-1659, 2007.
4. K. Degiampietro, R. Colaco, "Nanoabrasive Wear Induced by an AFM Diamond Tip on Stainless Steel" Wear, 263, 1579-1584, 2007.
5. B. Legrand, D. Stievenard, "Nanooxidation of Silicon with an Atomic Force Microscope: A Pulsed Voltage Technique" Applied Physics Letters, 74, 4049-4051, 1999.
6. K. Fukuzawa, T. Deguchi, T. Muramatsu, H. Zhang, Y. Mitsuya, "Nanofabrication of Solid Surface Using Probe Oxidation" Microsystem Technologies, 13, 1219-1225, 2007.
7. L. A. Nagahara, T. Thundat, and S. M. Lindsay, "Nanolithography on Semiconductor Surfaces under an Etching Solution," Applied Physics Letters, 57, 270-272, 1990.
8. F. P. Murano, K. Birkelund, K. Morimoto, J. A. Dagata, "Voltage Modulation Scanned Probe Oxidation" Applied Physics Letters, 75, 199-201, 1999.
9. A. P. Malshe, K. Wirwani, K. P. Rajurkar, and D. Deshpande, "Investigation of Nanoscale Electro Machining in Dielectric Oil," CIRP Annals, 54, 175-178, 2005.