

## 원자간력 현미경(AFM)과 펨토초 펄스 레이저를 이용한 나노 형상 가공

김승철\*, 김승우 (한국과학기술원 기계공학과)

AFM-based nanofabrication with Femtosecond pulse laser radiation

Seungchul Kim\*, Seung-Woo Kim (Mechanical Eng. Dept. KAIST)

### ABSTRACT

We describe a novel method of scanning probe nanofabrication using a AFM(atomic force microscopy) tip with assistance of Femtosecond laser pulses to enhance fabrication capability. Illumination of the AFM tip with ultra-short light pulses induces a strong electric field between the tip and the metal surface, which allows removing metal atoms from the surface by means of field evaporation. Quantum simulation reveals that the field evaporation is triggered even in air when the induced electric field reaches the level of a few volts per angstrom, which is low enough to avoid unwanted thermal damages on most metal surfaces. For experimental validation, a Ti:sapphire Femtosecond pulse laser with 10 fs pulse duration at 800 nm center wavelength was used with a tip coated with gold to fabricate nanostructures on a thin film gold surface. Experimental results demonstrate that fine structures with critical dimensions less than ~10 nm can be successfully made with precise control of the repetition rate of Femtosecond laser pulses.

**Key Words :** Nanofabrication(나노가공), Femtosecond Pulse Laser(펨토초 펄스 레이저), Field Evaporation, Atomic Force Microscopy(원자간력 현미경), Local Field Enhancement

### 1. 서론

1980년대 STM(Scanning Tunneling Microscope), AFM(Atomic Force Microscope)과 같은 Scanning Probe 기술이 개발되면서부터 이를 이용한 다양한 표면 위에서의 원자 단위 조작에서부터 수~수십 나노미터 크기의 형상 제작(fabrication)이 가능해 지게 되었다.[1]

이와 같은 Scanning Probe lithography 기술 중에 하나로서 Field Evaporation 을 들 수 있다. Field Evaporation 이란 나노미터 수준 또는 그 이하의 거리만큼 떨어진 탐침(Tip)과 시편 사이에 매우 강한 전기장(약 수 V/nm) 이 형성되게 되면 시편 또는 탐침의 표면원자들이 이온화되어 표면으로부터 이탈되는 현상을 말한다.[2] 이러한 Field Evaporation 의 정도, 즉 이탈되는 원자 개수는 주로 탐침과 시편 사이의 전기장의 크기, 전기장이 형성되어 있는 시간 및 온도 등에 영향을 받는다.

탐침과 시편 사이에 강한 전기장을 형성시켜주는 방법으로는 전압 소스의 두 전극을 탐침과 시편에 각각 연결하여 나노 초(ns) 수준의 전압 펄스를 인가시키는 방법과 탐침 끝부분에 펄스 레이저(Pulse Laser)를 조사하는 방법이 있다.[3] 펄스레이저를 사용하는 방법에 있어 전압 펄스의 방법보다 짧은 시간 동안만 전기장을 형성시켜줄 수 있기 때문에 열적으로 안정하면서 가공되는 양을 더 정확히 조절

할 수 있다. 또한 탐침의 끝 단에 레이저와 같은 빛을 조사하게 되면 SPM 탐침의 끝 단과 시편 사이에 국부적으로 매우 강한 전기장이 유도되게 되는데 이러한 현상을 Local Field Enhancement 라고 한다. 따라서 조사되는 레이저의 광량은 시편에 직접적인 영향을 주지 않으면서도 Field Evaporation 을 발생시킬 수 있다. 유도되는 전기장은 공간상에서 가우시안(Gaussian) 분포를 가지며 반차폭(FWHM)은 약 탐침 끝 단의 반지름 정도의 값을 갖는다. Local Field Enhancement 의 크기는 빛의 편광, 파장, 및 탐침의 재질과 기하적인 형태에 따라서 그 크기가 달라지게 된다.

펨토초 펄스 레이저는 수 fs 의 매우 짧은 펄스 폭을 갖는 레이저로서 펄스 폭이 전자-포논(Phonon) 커플링 시간보다 짧고 펄스 하나당 갖는 에너지가 SPM 탐침 및 시편이 직접 용융되는데 필요한 에너지보다 작기 때문에 어떠한 열적 효과(Thermal Effect)를 유발하지 않는다. 따라서 펨토초 펄스 레이저는 이러한 실험에 있어 매우 적합한 광원으로 볼 수 있다.

Field Evaporation에 필요한 전기장의 크기를 이론적으로 예측하고 자체 제작한 AFM 시스템에 펨토초 펄스 레이저를 조사하여 시편 표면에 약 깊이 2 nm, 폭 10 nm 크기의 구멍을 가공하였다.

## 2. 실험 구성 및 실험 원리

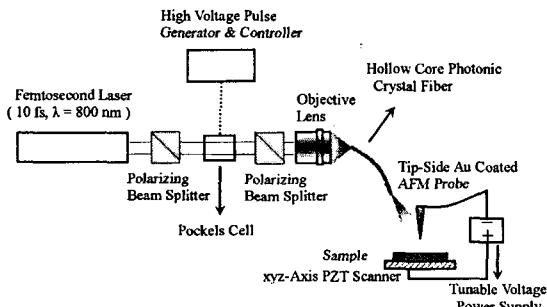


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Setup for Nanofabrication

실험 구성은 Fig. 1 과 같다. 광원으로는 10 fs,  $\lambda=800$  nm 인 Ti:sapphire 펨토초 레이저를 사용하였으며, 렐스 하나당의 에너지는 약 5 nJ 정도로 작기 때문에 시편이나 탐침에 열적 손상을 입히지 않는다. 그러나 레이저 렐스의 첨두 출력(Peak Power)은 수백 kW 이상이기 때문에 짧은 시간 동안 수 V/nm 정도의 전기장을 만드는 것이 가능하다. 편광광분할기(PBS)와 포켈소자(Pockels cell)를 이용하여 시편에 조사되는 렐스의 개수를 조절하였으며, 렐스레이저를 탐침 끝부분에 조사하기 위해 Hollow Core-Photonic Crystal Fiber를 사용하여 빛을 전달하였다. Hollow Core-Photonic Crystal Fiber는 일반적인 광섬유와는 달리 파장에 따른 빛의 분산(Dispersion)이 거의 없다. 또한 렌즈 시스템을 이용하여 탐침에 조사하는 경우에 비해 탐침과의 정렬(Align)이 용이하기 때문에 실험 시 광량을 더 정확하게 예측 할 수 있다. 실험에 사용된 AFM은 자체 제작된 시스템으로서 가공 시 탐침과 시편 사이의 거리는 약 1 nm로 유지하였으며, 시편과 탐침은 표면에 전기적 전도성을 주기 위하여 금(Au)을 증착하였다. 또한 빛의 전자기적 특성에 의해 전기장의 극성이 시간에 따라 연속적으로 변화함에 따라 시편과 탐침 사이의 전기장의 방향이 같이 변하게 된다. 이를 보완하기 위하여 시편과 탐침 사이에 정전압(Static Voltage)을 걸어주게 된다. 이 정전압의 크기는 Field Evaporation에 필요한 전기장의 크기의 약 80% 수준이므로 단지 정전압에 의해서 가공이 이루어지지는 않는다.

### 3. 결과 분석

Fig. 2는 Field Evaporation 현상을 이용하여 가공된 결과를 보여주고 있다. 측정은 실험에 사용된 AFM을 이용하여 측정하였으며, 컨택 모드(Contact mode)로 측정을 수행하였다. 약 깊이 2 nm, 폭 10 nm 크기의 구멍이 Au 표면 위에 생성되었으며, 이 때 렐스레이저에 의하여 생성된 전기장의 크기는 약 1 V/nm, 정전압에 의해 생성된 전기장의 크기는 약

4 V/nm 정도의 값을 가지며, 탐침과 시편 모두 펨토초 렐스레이저에 의한 직접적인 손상은 이루어지지 않았다. 이 때 Field Evaporation은 펨토초 렐스레이저에 의해 발생된 전기장과 정전압에 의해 발생된 전기장의 합에 의해 이루어졌으며, 시편 표면에서 원자가 이온화되어 이탈하면서 탐침과 시편 사이의 거리가 증가되면, 전기장의 크기가 감소하여 Field Evaporation이 중단되게 된다.

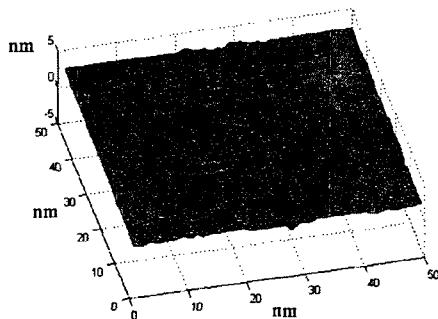


Fig. 2 Surface Nanofabrication Image of 10 nm Diameter Hole on Au film

### 4. 결론

펨토초 렐스와 AFM을 사용하여 나노미터 크기의 형상을 제작하고 측정하였으며 이는 시편과 탐침 사이에 형성된 전기장에 의한 Field Evaporation으로 가공되었다. 이러한 나노 가공 및 측정 방식은 향후 고집적도의 데이터 저장방식(Data Storage)으로서 응용될 수 있다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 과제(Creative Research Initiative, CRI)의 지원을 받아 한국과학기술원 BUPE(Billionth Uncertainty Precision Engineering) 연구단에서 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. C.F.Quate., "Scanning probes as a lithography tool for nanostructures," Surface Science, Vol. 386, pp. 259 - 264, 1997.
2. C.S.Chang,W.B.Su, and Tien T. Tsong, "Field Evaporation between a Gold Tip and a Gold Surface in the Scanning Tunneling Microscope Configuration," Physical Review Letters, Vol.72,pp. 574-577,1994.
3. B.Gault,F.Vurpillot,A.Bostel,A.Menand and B. Decon- ilhout, "Estimation of the tip field enhancement on a field emitter under laser illumination," Applied Physics Letters, Vol.86, pp..094101, 2005.