

Reading-Writing-Measuring Tool로서의 Atomic Force Microscopy의 최신 연구 동향

- Writing tool로서의 AFM (1) -

광운대학교 화학공학과 김영훈 교수

들어가며

이번 강좌에서는 AFM을 이용한 나노패터닝, 즉 광식각 방식의 한계를 뛰어 넘는 새로운 AFM lithography에 관하여 설명하고자 한다. 이는 AFM을 활용한 writing tool로서의 기능에 해당하며, dip-pen lithography로 대표되는 유기물 패터닝과, 외부에서 인가한 전류에 의한 anodic oxidation을 이용한 방법 등 다양한 패터닝 기법이 소개되고 있다.

기존 패터닝 기법과의 차별성

광식각 방식에 의한 나노패턴의 형성은 최근 삼성에서 50 nm CD(critical dimension)를 보이는 DRAM을 개발할 정도로 그 효용가치가 반도체 등과 같은 분야에 획기적인 일조를 하고 있는 것은 사실이다. 또한 상용화에 이르지 않는 않지만, Moore의 법칙에 의하면 매 18개월마다 기존 저장매체의 용량의 2배씩은 증가할 것으로 예상되며, 이에 따라 CD 값 개선을 기대할 수 있다. 기존의 I-line을 사용하는 광식각은 365 nm의 광원을 사용하지만, vacuum UV lithography는 F2 laser를 사용하여 157 nm의 광원을 사용하게 된다.

그러나 기존 광식각 방식에 의한 나노패터닝의 경우, 선폭을 작게 할수록 line resolution의 향상을 위한 고에너지의 광원이 필요하게 되고 이에 따른 부대장비의 가격이 급격히 증가하게 된다. 이에 21세기에 들어서는 광식각 방식이 아닌 새로운 방식의 나노패터닝에 관한 연구와 관심이 증대되고 있다. UV(400 nm, 3.1 eV), deep UV(250 nm, 4.96 eV), X-ray(0.5 nm, 2480 eV), electron(0.62 A, 20 keV), ion(0.12 A, 100 keV) beam lithography가 그 예이며, ion beam을 사용하는 경우가 고에너지의 광원을 필요로 하며 가장 좋은 분해능을 지닌 패턴을 구현할 수 있다.

최근에는 광원의 line resolution의 한계를 다른 방식으로 극복하고자 soft lithography, 즉 micro-contact printing, AFM anodic oxidation 등에 관한 관심이 증대되고 있다. Photolithography와 AFM lithography를 비교하면 Fig. 1과 같이 정리할 수 있다. 광식각의 경우는 짧은 시간내에 대면적 패턴이 가능하지만 마스크가 필요하게 되고, 마스크 제작에 많은 시간이 소요된다. 특히 가장 큰 단점은 나노패터닝을 위해서는 고분해능의 광원이 필요하다는 문제가 있다. 이에 비해, AFM lithography는 마스크가 필요 없으며

photolithography 보다는 우수한 line resolution(수 nm)을 보인다. 그러나 대면적 패터닝이 어려우며 패터닝 속도가 느리다는 단점이 있다.

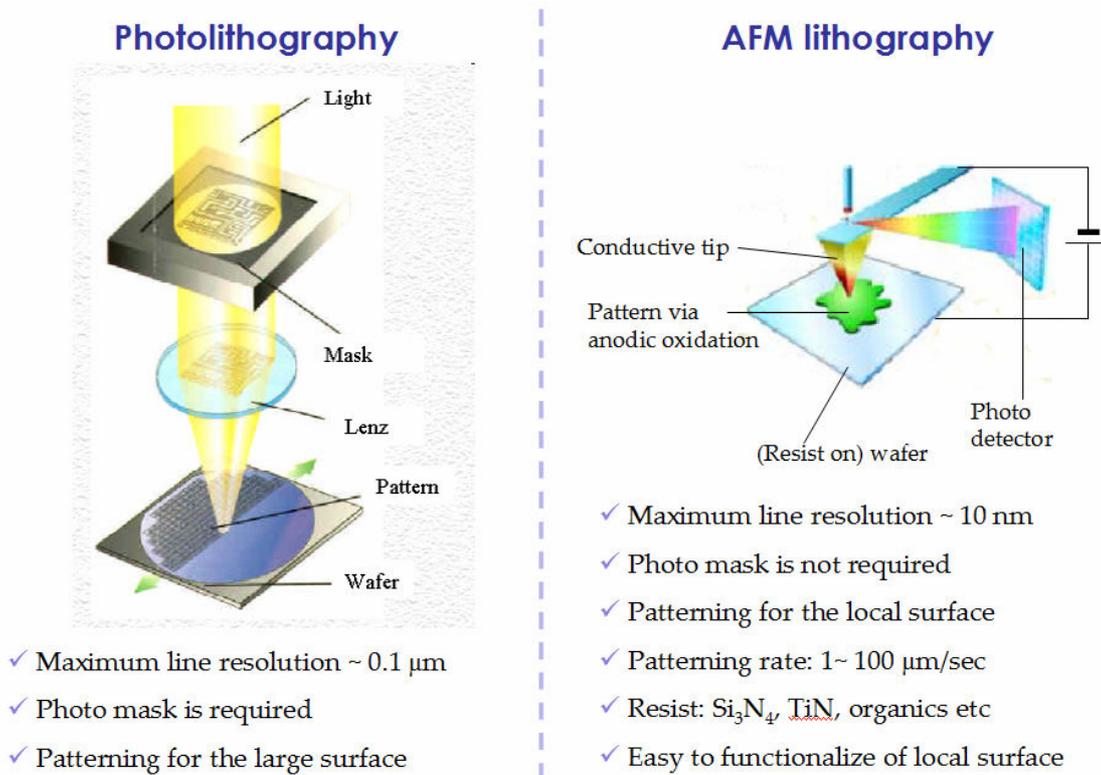


Fig. 1. Features for photolithography and AFM lithography.

따라서 AFM lithography는 국소영역에서 표면의 변형이나, 국소영역에서의 성분 분석, 전기화학적 성질 변화 관찰을 위한 나노패터닝 기법에 주로 사용된다. 최근에는 IBM에서 10 by 10 cantilever, 즉 100개의 캔틸레버를 동시에 구동할 수 있는 massive parallel writing array를 개발한 사례도 있으나, 아직까지는 AFM을 이용한 나노패터닝의 상업화는 어려운 것이 사실이다.

AFM 나노패터닝의 종류

AFM과 같이 탐침을 이용한 나노패터닝 기법을 SPL(scanning probe lithography)이라고 통칭한다. SPL은 패터닝 메커니즘, 얻고자 하는 분해능, 최대 패터닝 속도, 재연성 등을 고려하여 다양한 방식을 선택할 수 있다. 그 방식은 Fig. 2와 같이 여러 방법이 있으며, 탐침을 이용하여 표면을 직접 스크래칭하는 방법이나, 유기물을 잉크처럼 사용하는 dip-pen 방법과 Si 웨이퍼의 표면 산화를 이용한 방법 등이 있다[1].

✓ **Nano-scratching**

Directly scratching of substrate → tip abrasion

✓ **Dip-pen lithography**

Slow lithography (1~10 nm/sec), only positive patterning

✓ **AFM anodic oxidation**

Very fast lithography (10~1000 $\mu\text{m}/\text{sec}$)

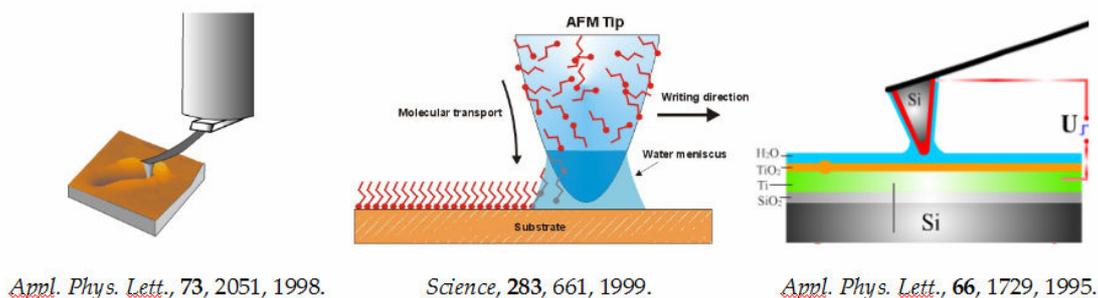


Fig. 2. Technical trend of SPL.

나노 스크래칭의 경우는 탐침을 이용하여 표면을 직접 긁어 내어 음각 패턴을 유도하거나, 유기물을 고정된 표면에 탐침을 이용하여 일부 영역을 제거하는 방식을 지칭한다. 이에 nano shaving이라고도 불리운다. 그러나 탐침과 시편과의 직접 접촉을 하기 때문에 팁 마모의 문제가 발생하게 되고, writing 다음의 연속적인 imaging scan 시에 이미지의 왜곡이 발생할 수 있다. Dip-pen lithography는 Chad A. Mirkin 그룹에 의해 개발된 방법으로, 탐침에 묻은 유기물을 탐침과 시편사이에 형성된 수분층을 이용하여 전사하는 방법이다. 양각 패턴이 가능하며, 유기물을 전사하는 속도가 느리다는 단점이 존재한다. 최근에는 e-beam lithography를 이용하여 탐침에 구멍을 만들어 잉크를 주입하는 방식도 개발되고 있다. 마지막으로 field-enhanced oxidation 방법이 있으며, 이는 주로 AFM anodic oxidation으로 알려져 있다. 이 방법은 실리콘 웨이퍼와 탐침 사이에 전류를 인가하여 실리콘을 산화실리콘으로 변형시키는 기법으로, 양각패턴이 가능하다. 또한 웨이퍼를 Si_3N_4 나 유기물 등으로 표면 처리하여 패터닝 속도를 향상시키는 연구도 진행되고 있다.

AFM 나노패터닝의 결과 예시

AFM 나노패터닝은 대면적 패터닝이 사실상 불가능하기 때문에 국소영역에서의 선택적인 표면 개질을 통한 소형 센서 또는 마이크로 시스템 구축 등에 활용된다. 다양한 SPL 기법을

이용한 나노패터닝은 예는 다음 그림과 같다. AFM을 이용할 경우, 현재까지 최소 10 nm 선 폭을 지닌 나노패터닝도 가능하다. Fig. 3은 나노튜브 탐침을 이용하여 보다 미세한 선폭을 제조한 결과이며, 일반적인 실리콘 탐침의 경우는 100 nm 정도의 선폭까지 만들 수 있다. 아래 그림은 anodic oxidation 기법을 사용한 것으로 브라운관 화면 주사방식인 raster 기법을 이용하여 이미지를 구현하였다.

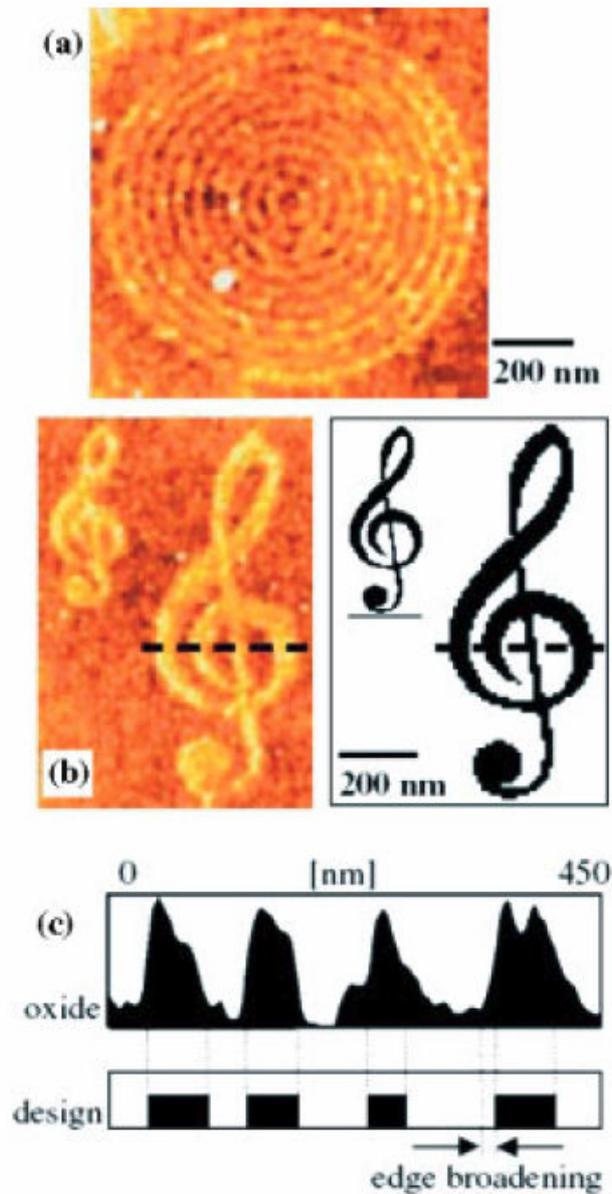


Fig. 3. Topographic images of oxide patterns fabricated using the raster-scan method with a multiwalled-nanotube probe. a) Concentric circles with a spacing of 50 nm, b) two oxide clefs, c) line profiles [2].

SPL 기법을 이용하여 패턴한 영역은 다른 물질, 금나노입자와 같은 나노입자의 표면 고정화를 위한 가이드라인으로 활용할 수 있다. Fig. 4는 표면을 양극산화시킨 부분에 금나노입자를 고정할 수 있는 유기물질(NH₂, SH)을 이용하여 표면처리한 다음 금나노입자를 고정시킨 결과이다. 이러한 기법을 이용하여 섬형태의 mesa 패턴의 전극도 제조 가능하다.

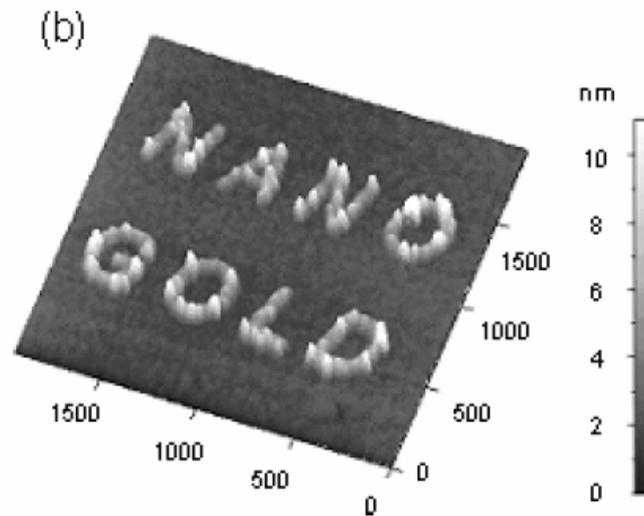


Fig. 4. AFM image showing colloidal Au nanoparticles deposited on SiO₂ surface via template-guided assembly [3].

또한 나노패터닝 기법으로 표면의 말단만을 선택적으로 산화시킬 수도 있다. 즉, 높이 변화를 유도하지 않고 표면의 성질을 변화시키는 방법으로, Fig. 5와 같이 최소산화전압을 이용하여 AFM oxidation을 유도한다[4]. 즉, 인가전압이 threshold voltage 보다 크면 Si(100)이 silicon oxide로 산화되면서 양각 패턴이 구현되지만, 그 전압이하 보다 작은 전압을 인가하면 유기물의 말단기만을 선택적으로 산화시킬 수 있게 된다. 또한 금속이온이 고정된 말단기에 전압을 인가하면 환원 반응을 통해 금속입자로도 고정시킬 수 있다[5].

나가며

다음 강좌에서는 SPL 중 AFM anodic oxidation에 관한 집중 조명을 하고자 한다. 이는 여러 SPL 기법중에 가장 범용적으로 사용하는 방법이며, 장비의 변형없이 용이하게 나노패턴 구현이 가능하다.

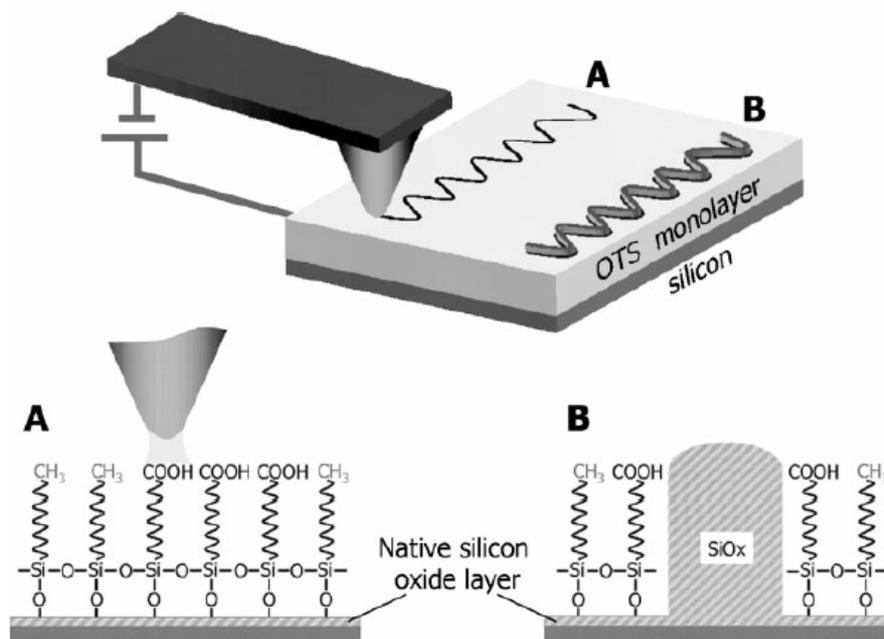


Fig. 5. Schematic representation of the electrochemical oxidation of OTS-covered silicon substrates. A) At small negative bias voltages and short interaction times, a selective oxidation of the surface terminal $-CH_3$ end groups to $-COOH$ functions takes place. B) Under more rigid oxidation conditions, the monolayer breaks down and a selective anodization of the silicon/silicon oxide substrate occurs. Within this process, silicon oxide is locally grown in the vicinity of the SFM tip [4].

참고문헌

- [1] H. T. Soh et al., Scanning probe lithography, Kluwer Academic Publishers (2001).
- [2] J. Loos, Adv. Mater., 17, 1821 (2005).
- [3] L. C. Taegue and J. D. Batteas, Adv. Funct. Mater., 7, 811 (2005).
- [4] S. Hoepfener et al., Adv. Funct. Mater., 16, 79 (2006).
- [5] I. Choi et al., Key Eng. Mater., 277-279, 903 (2005).