

◆특집◆ Nano Manufacturing I

Nanoprobe 응용기술 동향

장원석*, 신보성*, 황경현*

Nanoprobe Application Technologies

Won Seok Chang*, Bo Sung Shin* and Kyung Hyun Whang*

Key Words : SPM, Scanning Probe Microscope (주사형탐침현미경), STM, Scanning Tunneling Microscope (주사터널현미경), AFM, Atomic Force Microscope (원자간력현미경), SNOM, Scanning Near-field Optical Microscope (주사형근접장광학현미경), Lithography (리소그래피)

1. 서론

물질을 이루고 있는 원소들을 점점 작은 단위로 쪼개어 보면 결국에는 분자나 원자의 단위에 다다르게 된다. 결국, 물질은 분자나 원자로 이루어져 있으므로, 물질의 성질이나 특성이 그 물질을 이루고 있는 분자나 원자의 종류로부터 결정된다고 하는 것은 잘 알려진 사실이며, 이러한 개념이 최근 많은 과학자와 공학자들의 관심이 모아지고 있는 나노테크놀러지의 근간이 되고 있다. 그러나 아주 최근까지 물질의 모양을 만드는 한 개의 원자나 분자를 자유롭게, 직접 관찰할 수 있는 원자분해능의 현미경을 만드는 것이 공학자의 꿈이며 원자분해능 현미경을 사용해서 원자 레벨로 물질을 연구하는 것이 많은 연구자들의 꿈에 지나지 않았다는 것은 별로 알려져 있지 않다.

산업 전반에 나노테크놀러지가 보급되는 21세기 초기, 즉 2010년에서 2020년경에는 마이크로화

가 극한에 달아서, 미세 가공에서 미세 조립으로의 기술적 변화기가 도래하고, 이러한 시기의 기반기술로 주목받는 것 중의 하나가 본격적인 나노의 시대를 여는 계기가 되었던 주사형탐침현미경(SPM) 기술이다. 한 개의 원자나 분자를 자유롭게 관찰하는 원자분해능현미경이 실현된 것은 1982년 스위스 쥐리히의 IBM연구소에서 비닛히(G. K. Binnig) 박사와 로러(H. Rohrer)박사에 의해 주사터널현미경(STM)이 발명된 이후이며, 이들의 연구는 나노의 시대를 여는 공로가 인정되어 1986년 노벨 물리학상이 수여되었다.

SPM 기술은 나노사이즈의 프로브를 이용하여 nm 스케일로 분석·평가하는 도구로써 궁극적인 원자·분자의 과학과 기술의 시대에는 SPM이 개개의 원자·분자를 관찰, 평가, 분석, 제어, 조작해서 조립하는 Bottom-up 방식의 미세 조립 및 가공기술을 위한 핵심 도구가 될 것으로 기대되고 있다.

이러한 나노프로브 기술의 중요성이 인식되면서 서방의 선진국에서는 더욱 다양하고 대규모의 연구비가 투자되는 연구가 수행되고 있다. STM의 탄생지인 유럽의 경우, 특히 독일 정부에서는 나노테크놀러지의 여섯 분야를 조직화해서 집중적으로 예산투자(<http://www.nanoanalytik.de/>)를 하고 있는데, 주사형탐침현미경은 나노분석기술의 중핵기술로 지정되었으며, 규모가 매우 큰 AFM그룹인 함부르

* 한국기계연구원 나노공정그룹

Tel. 042-868-7134, Fax. 042-868-7149

Email paul@mailgw.kimm.re.kr

나노프로브 응용기술 특히, 프로브와 근접장 광학계를 응용한 나노스케일 가공기술 및 생체분자 조작기술 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

크대학, 뮌헨대학, 뮌스크대학 세곳에 ‘나노스케일 분석 센터’를 설치하고 있다. 책임자는 함부르크대학의 비겐당거(R. Wiesendanger) 교수이며, 극저온 비접촉 AFM의 연구·개발에 노력하고 있다. 스위스에서는 SPM그룹의 책임자가 바젤대학의 귄타로드(H. J. Guntherodt) 부학장인데, 나노테크놀러지 국가 프로젝트(Top Nano21)(<http://www.ethrat.ch/topnano21/>)의 총괄책임자가 되어 백개의 나노테크놀러지 연구 프로젝트를 수행하고 있다. 바젤(Basel)대학은 이 프로젝트의 나노분석 담당으로, 여기에서도 비접촉 AFM의 연구·개발에 특히 노력하고 있다. 이와 같이 유럽에서는, 비접촉 AFM의 분야를 나노테크놀러지 연구의 중심으로 삼아 적극적이며 중점적으로 강화하고 있다.

본 논문에서는 현재 SPM기술의 주축을 이루고 있는 주사터널현미경(STM), 원자간력현미경(AFM), 주사형근접장광학현미경(SNOM)의 기본적인 원리 설명과 현재까지의 나노 가공기술관련 연구결과를 중심으로 근래의 연구동향과 그 응용에 대해서 살펴보고 또한 앞으로의 나노프로브 기술의 전망을 예측하고자 한다.

2. 주사탐침현미경(SPM)

2.1 주사터널현미경(STM)

STM의 기본은 Fig. 1과 같이 뾰족하게 튀어나온 선단을 가진 탐침의 터널전류의 측정이다.

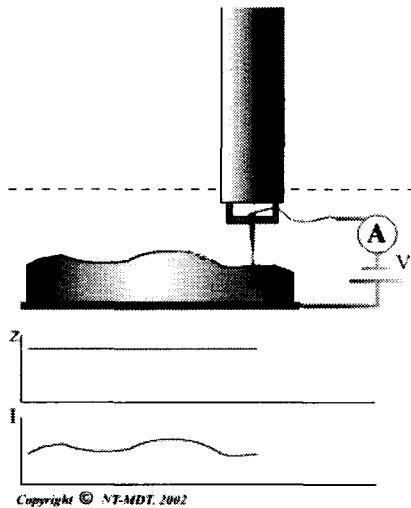


Fig. 1 Schematic diagram of STM

터널효과라는 것은 에너지 E를 가진 전자와 같은 작은 입자가 에너지 E보다 큰 퍼텐셜을 가진 얇은 장벽(tunnel-barrier)에 충돌했을 때 일어나는 현상이다. 뉴턴이 완성시킨 고전역학에서는 공이 벽에 충돌하면 공은 반드시 던진 쪽으로 돌아오지만 양자역학에서는 전자는 입자의 성질뿐만이 아니라 파의 성질을 가지기 때문에 벽에 충돌해도 돌아올 가능성(확률)만이 아니라, 벽을 뚫고 나가는 확률도 존재한다. 이 벽을 투과하는 확률을 터널 확률 T라고 부르며 터널전류 I(Z)는 터널확률 $T \propto \exp(-Z/L)$ 에 근사적으로 비례해서, 프로브-시료간의 수직 거리 Z에 지수 함수적으로 의존한다. 감쇠거리 L은 거리 Z 등에 의존하지 않는 상수이고, 일함수 ϕ , 프랑크상수 \hbar 와 전자의 질량 m을 이용해서 $L = \hbar / [2(2m\phi)]^{1/2}$ 로 나타낼 수 있다. 이 감쇠거리 L의 값은 일함수 $\phi = 4eV$ 라고 하면 $L \approx 0.05nm$ 가 된다. 따라서 수직거리 Z가 0.1nm 커지면, 터널전류 I(Z+0.1nm)는 원래의 전류 I(Z)의 e^{-2} 로 약 10분의 1이 되는 것이다. 이것을 역으로 생각해서 터널전류를 오차 10%정도로 측정할 수 있다고 하면, $[I(Z) - I(Z + \Delta Z)] / I(Z) = 0.1$ 로부터 $\Delta Z \approx 5 \times 10^{-3}nm$ 의 오차로 거리 Z를 측정할 수 있다. 이러한 터널전류의 거리 Z에 대한 강한 지수 함수 의존성이 STM의 고분해능이 가능한 이유이다. 이때 프로브 끝의 원자 한 개로부터 터널전류가 흐른다면 전류의 절대치가 매우 작아지게 되므로 가능한 한 터널전류를 크게 하려면 프로브와 시료간의 거리 Z를 작게 할 수 밖에 없다. 실제 터널전류는 Z가 1nm라고 하더라도 0.1nA이하로 생각되므로 정밀한 전기 측정기술이 필요하게 된다.

STM으로 표면의 현미경상을 얻기 위해서는 3차원으로 움직이는 미동 기구를 사용하여, 프로브를 샘플표면을 따라 2차적으로 주사할 필요가 있다. 그 결과 X, Y의 함수로써 터널전류 I(X, Y)가 측정되고 그것으로부터 프로브-시료간의 거리 Z를 2차원 좌표위에 매핑(mapping)하게 되어 샘플표면의 위상(Topology)를 측정할 수 있게 된다. 또한 터널전류가 일정한 값을 갖도록, 피드백 회로를 통해 압전체에 전압을 가해, 탐침 선단을 상하로 움직이며, X, Y방향으로 주사하면, 그때 Z 방향의 압전체에 걸려준 전압의 의존성이 바로 시료 표면의 위상이 된다.¹

2.2 원자간력현미경(AFM)

터널전류를 측정하는 STM의 단점은 전류가 흐르지 않는 절연체 표면을 관찰할 수 없다는 것이었다. 이러한 점 때문에 절연체의 표면을 측정하기 위하여 STM을 발명한 Binnig박사는 미국 스탠포드 대학의 쿼트(C. F. Quate) 박사와 공동으로 STM탐침과 절연체 시료의 표면 사이에 작고 부드러운 AFM 지레(Cantilever)를 끼워 넣었다.² 이 지레의 등쪽면은 전류가 흐르는 금속으로 되어 있어서, AFM 지레 배면과 STM 프로브와의 사이에 터널전류의 측정이 가능하게 되어 있다. 한편 AFM 지레의 프로브 팁과 시료 표면은 역학적 상호 작용에 의해, 지레는 샘플 표면으로부터 인력 또는 척력을 받아 휘어지게 된다. 이 휘어짐에 따른 프로브와 지레 뒷면의 거리의 변화가 터널전류의 변화로써 검출된다. 이 방법은 지레의 휘어짐에 따른 거리 변화의 측정 방법으로는 매우 고감도 이지만 유연한 지레를 시료의 원자 한 개와 접촉시키거나 또는 비접촉 상태를 유지하도록 하면서, 그와 동시에 STM 프로브를 부딪치지 않고 지레 등쪽면에 1nm 이내로 접근시키는 것이 곤란하였다. 실제, STM 프로브와 지레의 등쪽면이 부딪쳐 지레의 금속 코팅면이 벗겨져 전류가 흐르지 않는 일이 자주 발생했다고 한다. 그 때문에 현재의 상용화된 AFM은 이러한 방식을 쓰지 않고 Fig. 2와 같이 레이저 광을 이용한 측정법이 주로 쓰이고 있다.

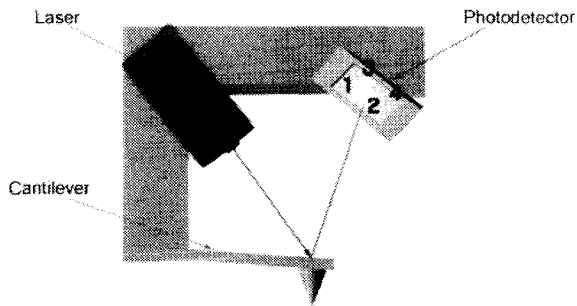


Fig. 2 Cantilever deflection detection scheme

이 방법은 지레의 등쪽면에 레이저광을 경사지게 입사시켜, 지레의 변위에 따른 레이저광의 반사각의 변화를 4분할 광다이오드에 입사하는 광강도의 상대 변화로써 검출하는 것으로 광지레 AFM이라고 불린다. 광지레 AFM으로 검출 가능한 지레의

변위로는 지레 선단의 Z방향의 휘어짐과 지레 선단의 X방향에의 비틀림이 있다. Z방향의 휘어짐은 4분할 광다이오드에 입사하는 광강도의 $(1+4)/(2+3)$ 의 출력 변화로써, X방향 비틀림은 $(3+4)/(1+2)$ 의 출력 변화로써 검출할 수 있다. 휘어짐의 측정은 원자간력의 측정으로 시료 표면의 위상측정 결과를 나타내고, 비틀림 측정은 수평력, 즉 마찰력의 측정 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

2.3 주사형근접장광학현미경(SNOM)

STM이나 AFM은 렌즈를 사용하지 않는 현미경이며 파장에 의존하지 않고 공간분해능을 갖는 현미경이다. 그러면, 광학현미경과 같이 종래는 렌즈를 사용해오던 현미경이라도, 파장에 의존하지 않고 공간분해능을 갖는 현미경을 만들 수 있을 것인가에 대해 많은 과학자들이 관심을 갖게 되었다. 이것은 1928년 싱게(E. A. Syngge) 박사의 논문에서 현미경의 분해능의 한계를 극복하기 위한 개념이 처음 제안되었으나³ 시료의 표면과 파장보다 작은 핀 홀(aperture)을 수십 나노 이내로 접근시킬 수 있는 기술력이 없어 실현되지 못한 채 남아 있다가 1988년 폴(D. W. Pohl)박사에 의해 주사형근접장광학현미경이라는 이름으로 처음 발표되었다⁴.

광학현미경으로 파장에 의존하지 않고 공간분해능을 갖는 현미경을 만드는 데는 Fig. 3과 같이 파장보다 작은 핀 홀을 이용한다.

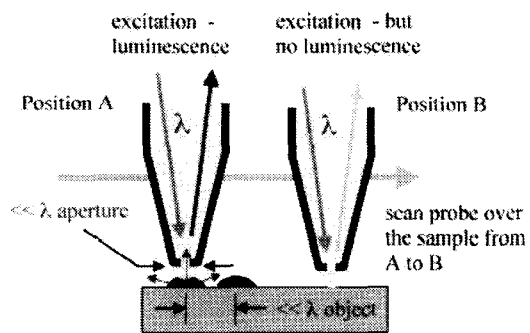


Fig. 3 The concept of SNOM

이때도 두 가지 방법이 있는데 핀 홀을 통과한 점광원을 이용해서 시료의 국부적인 투과광을 측정한다. 또 하나는 시료를 투과해 온 광을 핀 홀을 통해서 특정영역만의 투과광을 측정하는 방식이다.

어느 쪽도 시료가 충분히 얇고 핀 홀이 시료와 밀착해 있는 경우는 공간분해능은 파장에 의존하지 않고 핀 홀의 크기로 결정된다. 실제로는 핀 홀을 샘플에 밀착시키는 것이 기술적으로 어려우므로 현재는 끝을 뾰족하게 한 광섬유에 알루미늄(Al), 금(Au), 은(Ag)과 같은 금속코팅을 하고 나서 그 끝단에 핀 홀을 만든 광섬유를 사용하거나 실리콘 프로브 팁을 식각하여 미세한 핀 홀을 형성하여 상용화된 장치들을 볼 수 있다. 이러한 방법에는 위에서 설명한 바와 같이 점광원을 이용하거나 점 검출을 행하는 방법이 있고 또한 투과광을 측정하는 투과법 만이 아니라 반사광을 측정하는 반사법도 있다. 광학현미경에는 STM이나 AFM과는 달리, 자극에 해당하는 광원과 프로브에 해당하는 광 검출기를 분리할 수 있기 때문에 측정 방식에 다양성을 갖는다.

NOM으로 현미경상을 얻는 데는 STM과 마찬가지로 주사와 피드백을 사용한다. 다른 점은 투과광에서는 프로브와 시료 표면 사이의 거리를 측정할 수 없기 때문에 표면의 위상을 피드백 제어를 할 수 없다는 것이다. 따라서 표면의 위상을 측정하기 위해서는 SNOM을 STM 또는 AFM과 복합화해서 터널전류나 지레의 휘어짐을 동시에 측정하는 방식으로 피드백 제어하여 사용한다.

3. 주사탐침현미경(SPM)의 응용

SPM을 이용한 응용은 원자 스케일의 정밀도를 갖는 원자분해능현미경에서 원자나 분자의 조작기술, DAN 및 생체분자 반응계측 및 정보저장장치, 나노스케일 리소그래피(lithography)에 이르기까지 다양한 분야에서 응용이 되고 있으며 향후 그 응용범위는 더욱 넓어질 것으로 예상되고 있다. 본 논문에서는 이러한 응용 중 나노스케일의 가공기술과 관련된 프로브를 이용한 패터닝 기술에 중점을 두고 각각의 메커니즘별로 구분하여 설명하고자 한다.

3.1 원자 배열법

SPM 프로브를 이용하면 나노입자, 분자, 혹은 단 원자를 직접 배열하여 나노구조체를 만들 수 있다.⁵⁻⁸ 이때 표면에 배열되는 입자는 원자 수준의 정밀도로 배열될 수 있으며 프로브 팁을 이용하여 표면을 따라 입자를 밀거나 미끄러뜨리는 방법으로 배열한다. 이러한 방법으로 Gimzewski 등은 STM으

로 상온에서 C₆₀ 분자를 배열하여 나노스케일의 주판모양을 만들어 발표하였다⁹. 또한 Eigler 등은 4K의 저온에서 개별적으로 위치한 48개의 철 원자들을 미끄러뜨리는 방법으로 Fig. 4와 같은 71.3Å 반경의 링을 만들어 쿼텀 코럴(quantum corral)을 만들기도 하였다¹⁰. 이렇게 만들어진 코럴은 일정 영역 안에 전자를 가두는 효과를 만들어 내는 것이 확인되었다.

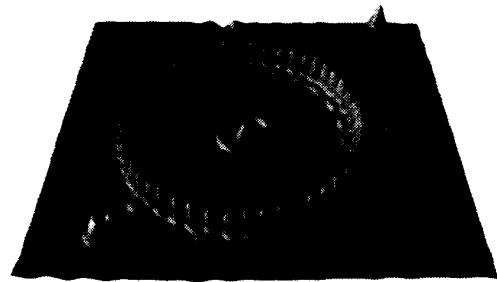


Fig. 4 Image of quantum corral

또 팁과 시료사이의 정전기적, 화학적 힘에 의하여 표면의 개별적인 원자를 선택적으로 제거할 수도 있으며 차후에 다시 증착할 수도 있음이 발표되었다^{8,11}.

나노프로브를 이용한 원자 조작법은 필요한 형태의 원자 구조물을 만들고 극미세의 구조물에서의 물리적 현상을 연구하는 데는 가장 강력한 수단으로 생각되어지고 있다. 그러나 원자 스케일의 정밀도를 갖는 리소그래피의 장점과 함께 큰 스케일의 패터닝을 하는 방법으로는 Bottom-up 프로세스의 특성상 매우 느린 생산속도를 가지므로 적용이 불가능하다는 단점을 가지고 있다.

3.2 국부적 산화막 형성법

시료의 표면에 산화막을 형성하여 하는 리소그래피(AFM Oxidation Lithography)는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 AFM 프로브와 시료사이에 전압을 인가하면 팁의 주위에 강력한 전기장이 형성되어 시료의 표면을 국부적으로 산화시키는 방법이다. 이 방법은 Dagata와 동료 연구자들에 의하여 단결정 실리콘에 산화막을 형성한 결과가 발표되었다¹². 이 공정에서 실리콘 시료는 패터닝을 하기 전에 미리 불소산(HF)용액에 담가 실리콘 표면에 이미 형성되어있는 기존의 산화막을 제거하고 표면에 수소 막

을 입혀 대기 중에서 산화되는 것을 막아준다. 이렇게 준비된 시편에 음극으로 대전된 프로브 팁을 가져가면 팁 주위의 강력한 전기장에 의하여 실리콘 표면의 수소 층을 떼어내면서 또한 공기 중의 물을 이온화 시켜 이 이온들이 전기장에 의해 시료의 표면으로 가속되면서 실리콘과 반응을 일으켜 산화막을 형성하게 된다.

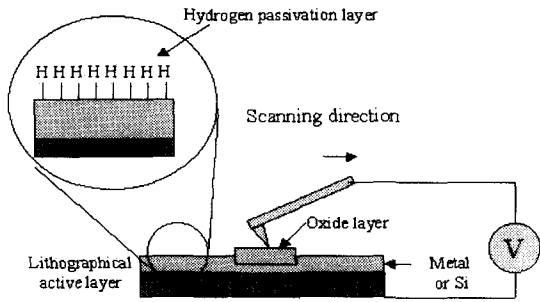


Fig. 5 Schematic diagram of surface modification using field-enhanced oxidation of silicon

이때의 산화특성은 시료표면의 형태뿐만 아니라 전기적 물리적 특성에 의해서도 달라진다. 또한 인가하는 전압의 세기를 조절하면 산화층이 자라는 높이를 변화시킬 수 있어 이를 이용하여 표면의 밝기를 조절하여 Fig. 6과 같이 보다 복잡한 형태의 패턴을 만들어낸 결과도 발표되었다.

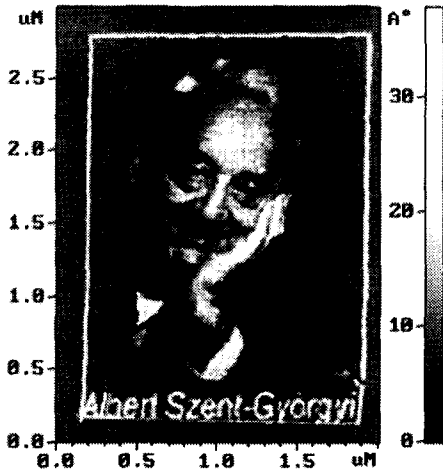


Fig. 6 Portrait of Nobel Laureate A. Szent-Gyorgyi using local oxidation

이와 관계된 기술로 티타늄, 탄탈륨(tantalum), 크롬, 알루미늄과 같은 금속 시료를 산화시키는 방법이 있다. 이러한 방법을 이용하여 실리콘 기판위에 매우 얇은 티타늄코팅을 한 시료에 전압을 인가한 프로브를 이용하여 국소 산화막을 형성 시켜 8nm 선폭을 갖는 산화막 패턴을 만들어낸 결과가 발표되었다. 이렇게 형성된 산화층의 선은 단 전자 기구뿐만 아니라 상온에서 전자의 터널현상을 막는 방어막을 형성할 수 있다. 이러한 방법을 이용하여 단 전자 트랜지스터 생산에 응용하고자 하는 연구 결과들이 발표되었다¹³⁻¹⁴.

3.3 기계적 & 열기계적 방법

이방법은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 프로브를 마치 쟁이로 발을 가는 것과 같은 원리로 시료의 표면을 직접 긁어서 패턴을 만드는 방법이다.

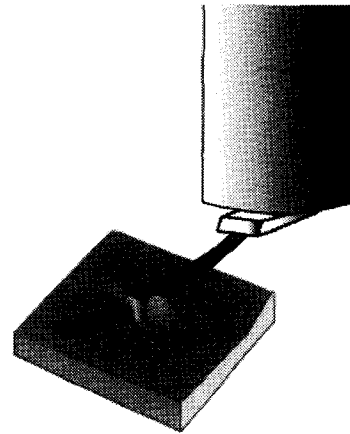


Fig. 7 Schematic diagram of surface modification using probe scratching

간단한 원리에 의하여 많은 연구자들이 시도를 하였으며 개발자에 따라 여러 가지의 공정으로 이름 붙여졌다¹⁵⁻¹⁶. 영문으로는 nano-engraving, nanoscratching, nanoplowing 등의 이름으로 명명되었다. 단어의 뜻에서도 알 수 있듯이 AFM 프로브를 시료의 표면에 접촉시켜 일정 힘을 인가하여 부드러운 레지스트(resist) 층이나 얇은 금속층을 제거하여 패턴을 만들어 내는 방법이다.

이 방법은 프로브 팁의 형상과 인가되는 힘에 따라 가공 패턴의 형태가 결정된다. 이 방법의 장

점은 전자빔이나 이온빔을 이용한 가공과 비교할 때 정확한 정렬을 하기가 용이하며 주변 재료에 손상을 주지 않는다는 것이다. 이러한 방법은 Josephson 정션(junction)을 만든 것으로 응용되었는데 프로브로 알루미늄 박막을 긁어내고 이것으로 초전도 나노수축(nanoconstriction)을 정의하였고 이것은 Josephson 정션으로서의 역할을 하게 되어 국소의 광원이나 파장변조가 가능한 밀리미터 파장 파형소스를 칩 내에 집적하는 것으로 응용되었다¹⁷. 또한 AFM의 팁을 접촉모드(contact mode)로 사용하기 때문에 표면의 상태와 프로브에 인가되는 힘에 따라 스크래칭이 되는 부분도 있으나 마찰 없이 미끄러져 가는 부분이 생기는 것도 관찰된다. 이러한 결과는 재료의 미세 마모 특성을 연구하는 중요한 단서로 이용되어 최근 많이 사용되는 저장장치 헤드에 쓰이는 실리콘, 전자 패키징을 위한 폴리머, 액정소자와 같은 재료들의 특성을 연구하는데 매우 유용하게 응용되고 있다¹⁸.

진술한 방법은 프로브 팁을 시료의 표면에 접촉하여 직접 가공하는 방법으로 정적 스크래칭(static scratching)으로 불리며 레지스트의 층을 제거한 뒤 이것을 마스크로 사용하여 실리콘 기판에 나노단위의 구조물을 성형한 결과도 발표되었다. 이 방법은 비용이 싸고 비교적 쉽게 할 수 있다는 장점이 있으나 레지스트를 패터닝할 때 AFM 지레의 비틀림에 의해 불균일한 에지를 만들 수 있고 시료의 국부적인 강도에 많은 영향을 받으며 가공된 표면을 AFM으로 측정할 때 추가적인 표면의 손상을 가져올 수 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 개발된 것이 동적 스크래칭(dynamic scratching)의 방법이다¹⁹. 이 방법은 샘플 표면의 레지스트 박막에 공진에 가까운 주파수로 진동하는 프로브 팁을 접근시켜 소성 변형으로 인덴트(indent)를 만든다. AFM 지레의 진폭과 팁의 이송거리를 조절하면 인덴트의 길이와 방향으로 나노스케일의 패터닝이 가능하게 된다. 프로브 팁과 시료의 비접촉 방식은 시료에 손상을 주지 않고 가공과 측정을 할 수 있다는 장점이 있으며 또한 팁의 마모를 줄여 마모에 의한 패터닝의 불균일성을 줄이는 효과가 있다. 이러한 장점에 의하여 최근 비접촉 AFM의 분야가 바이오 분야에 적용하기 위하여 활발히 연구되고 있다.

열기계적 패터닝 방법은 고밀도의 저장장치의 적용에 사용되고 있는데 팁을 폴리카보네이트 시료

에 접촉시키고 폴리머의 변이온도(glass transition temperature)까지 강열시킨 뒤 일정 힘을 가해서 데이터 기록을 위한 작은 점을 만들게 된다. 이렇게 해서 기록을 하고 읽을 때는 팁의 지레가 기록된 점들을 주사하면서 지레의 변형을 측정하는 방식으로 이루어진다. 이런 방법은 현재 IBM¹⁹에서 가장 많은 성과를 이루었으며 속도를 높이기 위하여 Fig. 8에서와 같이 AFM 프로브를 2차원 배열로 제작하여 기존의 저장장치보다 훨씬 작은 칩 형태의 저장장치를 제안하고 있다.

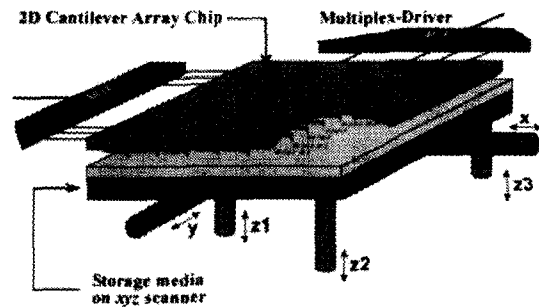


Fig. 8 The concept of AFM-based storage system

3.4 전자장 노광법

STM을 이용한 리소그래피 방법은 ๞족하게 에칭된 텅스텐 와이어 팁과 시료사이에 일정한 전압을 인가하여 팁으로부터 전자의 방출을 유도하여 레지스트를 노광하는 방법이다. 팁과 시료사이의 공간은 레지스트에 입사되는 전자빔의 세기를 일정하게 해주기 위하여 제어를 해주게 된다. 이 방법으로 STM은 레지스트에 30nm이하의 레지스트 선폭을 달성할 수 있었으나, STM을 이용하여 시료를 정렬할 때 또다시 팁으로부터 전자가 방출되어 레지스트를 감광시키기 때문에 정확한 위치를 맞추는데 어려움이 있으며 STM 리소그래피를 위한 적절한 전압 값을 찾는 데 많은 시행착오를 거쳐야 한다. 가령 인가된 전압이 너무 크면 팁과 시료의 거리가 멀어져야 하고 그러면 전자빔의 분포가 넓어져서 패터닝의 선폭이 넓어지고, 전압이 너무 작으면 패터닝을 할 수 있는 위치로 팁을 시편에 가져갈 때 자칫하면 팁 끝이 레지스트 속으로 침투되는 문제가 발생 할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 스탠포드 대학의 쿠에트(E. F. Quate) 교수팀은 Fig. 8과 같이

AFM과 STM을 결합한 hybrid AFM/STM 시스템으로 팁과 시료간의 힘(force) 제어와 팁으로부터의 전류흐름(field-emission current), 두개의 독립적인 피드백 체계를 이용하였다²⁰.

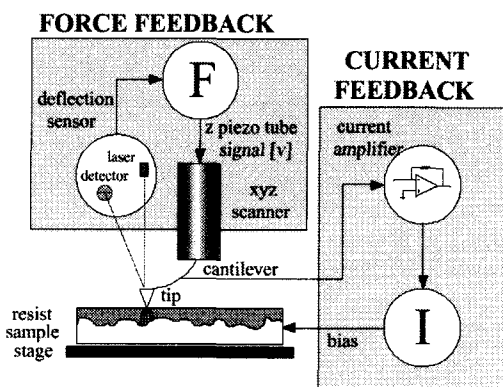


Fig. 9 Schematic diagram of the hybrid AFM/STM lithography system

AFM의 원자간력을 피드백 제어하는 루프는 전자를 방출하지 않고 시료와 팁 간의 거리를 유지시키고 표면의 위상을 계측하여 정렬시 레지스트에 전자가 노광되는 것을 방지 하였으며, 전류의 피드백 루프는 레지스트를 노광할 때 일정한 전자빔이 가해질 수 있도록 팁과 샘플에 일정한 전압이 인가될 수 있도록 제어하였다.

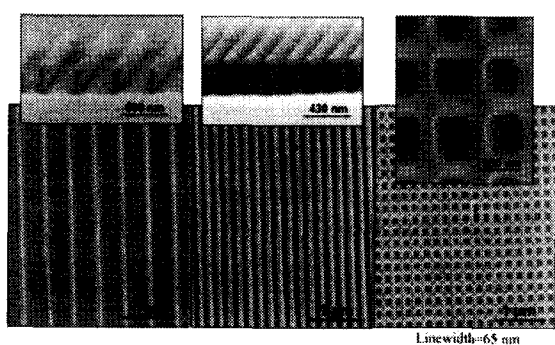


Fig. 10 SEM images of etched silicon features patterned by SPL

이러한 방법으로 프로브 팁으로부터 전자빔이 레지스트에 인가되어 패턴이 형성되면 일반적인 반

도체 공정에서와 같이 패턴을 현상하고 선택적 에칭을 통하여 실리콘과 같은 기판에 나노 스케일의 패턴을 만들게 된다. 이 방법은 1980년대 중반 McCord와 Pease¹³에 의해서 처음 발표되었으며 100nm이하의 선폭을 갖는 패턴을 얻을 수 있었다. 그후 많은 연구자들에 의해 속도와 공정의 개발이 이루어져 현재 3mm/s의 속도로 siloxene(spin on glass, SOG)에 패턴을 형성한 결과가 발표되었다²¹.

3.5 딥 펜 리소그래피

DPN(Dip Pen Lithography)은 노스웨스턴 대학의 머킨(C. Mirkin) 교수 그룹에서 처음 개발된 것²²으로 Fig. 11에서 보는 바와 같이 대기 중에서 자연적으로 형성되는 현상인 용매의 표면장력을 통해 분자들을 AFM 팁을 사용하여 표면으로 전달하는 방법으로 분자 패턴을 하는 방법이다.

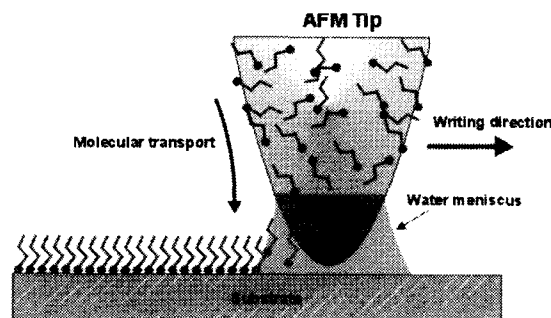


Fig. 11 DPN Schematic Diagram (Dip-Pen Nanolithography: Transport to a surface via a water meniscus)

이러한 직접묘사기술은 수많은 분자 및 잉크(thiol)를 AFM 팁에 묻혀서 금속, 반도체, 기능성 단분자층 등과 같은 다양한 종류의 표면에 writing함으로써 고정밀도의 패턴링이 가능하게 한다. 특히 딥펜 방법은 패턴 선폭의 분해능이 팁에 인가되는 힘과는 무관한 특징이 있어 하나의 피드백 시스템으로 여러 개의 동일한 나노 패턴을 형성할 수 있다. 이러한 점을 이용하여 최근 머킨교수 그룹에서는 다수의 AFM 팁을 이용하여 나노플로터(nanoplotter)를 개발하여 좀 더 빠른 속도로 나노 패턴을 형성할 수 있는 방법을 발표하였다²³.

또한 실리콘 기판위에 100nm 이하의 유기패턴을 형성한 결과도 나오고 있어 비교적 간단한 방법

으로 나노 스케일의 패터닝을 얻을 수 있는 대안으로 제시되었다²⁴. Fig. 12는 실리콘 기판위에 패터닝된 결과이다.

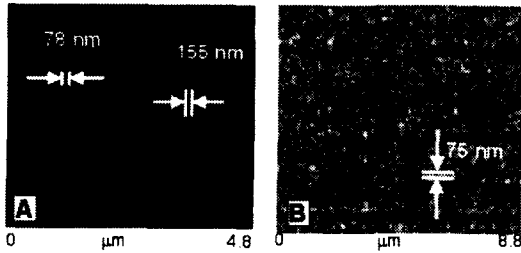


Fig. 12 LFM images of HMDS patterns generated on A) Silicon oxide, and B) gallium arsenide

3.6 근접장 리소그래피

SNOM 리소그래피는 파장보다 작은 핀 홀(aperture)을 통하여 나오는 근접장 광을 이용하는 것으로 나노 스케일의 광원을 이용하는 광리소그래피라고 생각할 수 있다. 그러나 이때 사용되는 핀 홀의 직경이 작아질수록 통과되는 광의 강도는 급격하게 감소되어 100nm이하의 핀 홀을 통과하는 경우 10^{-6} 정도의 감쇠가 있다고 알려져 있다.

이러한 점 때문에 일반적으로는 패터닝을 하거나 광 정보 저장장치(Optical Data Storage)의 사용이 매우 어렵기 때문에 광량의 투과율을 높이기 위하여 레이저가 입사하는 핀 홀부의 테이퍼 각(taper angle)을 다단으로 주거나²⁵, 근접장 광원의 빔강도 (beam intensity)를 높이기 위하여 수십에서 수백 펨토초(femtosecond)의 레이저 펄스를 인가하여 금속 박막을 어블레이션(ablation)한 결과도 발표되었다²⁶. 최근에는 SNOM의 미세한 핀 홀에 의한 작은 광 투과성 때문에 Fig. 13에서 보는 바와 같이 시료위에 LB film²⁷이나 SAM(Self Assembled Monolayer)²⁸를 도포하고 이것을 패터닝한 뒤 선택적 식각을 하는 연구가 이루어지고 있다.

4. 나노프로브 기술의 미래

본 논문에서는 나노프로브를 응용하는 방법 중 STM, AFM, SNOM에 대하여 간략하게 살펴보고 이들의 응용한 현재까지의 나노스케일의 제조기술을 살펴보았다. 그러나 이러한 제조기술은 그 응용에

있어 매우 작은 일부분이며 현재는 고속의 원자분해능과 DNA 염기서열까지 해독할 수 있는 극한의 기술개발이 각국에서 경쟁적으로 이루어지고 있다.

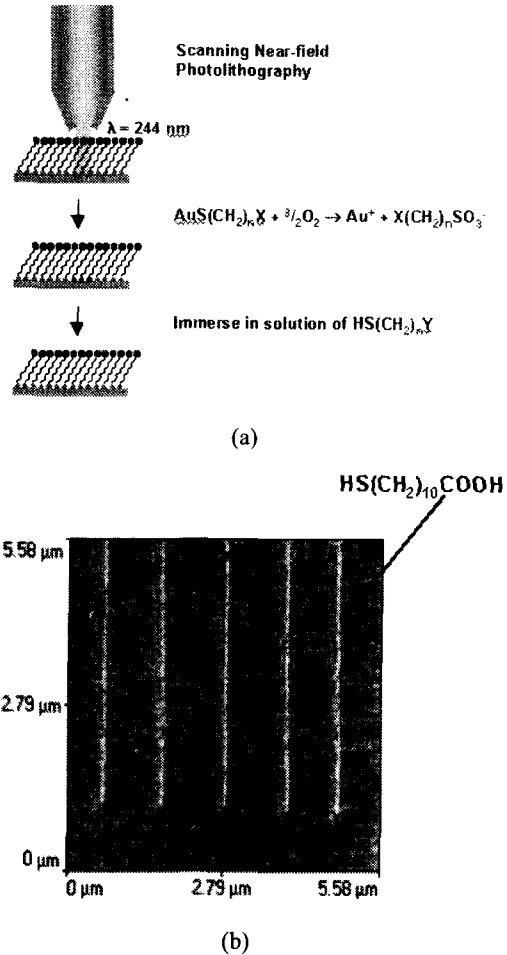


Fig. 13 (a) Schematic diagram illustrating the principles behind SNP, (b) Lines of mercaptoundecanoic acid written into a SAM of hexadecanethiol by SNP

나노프로브 기술은 나노기술의 처음을 열었으며 또한 2010년에서 2020년경에 도달할 것으로 예상되고 있는 ‘원자와 분자 과학기술 시대’에는 한 차원 더 높은 계측, 제어, 조작 장치의 개발에 더 큰 역할을 할 것으로 예상되고 있다. 또한 21세기 전반에 도달하는 성장 한계, 지구의 위기, 인류의 위기의 근본적 해결방법이 될 가능성을 지닌 원자

분자 기술은, 미세 조립이나 원자분자 어셈블리나 나노머신을 가능하게 할 꿈의 기술이기도 하며, 21 세기의 악몽을 해결해서 21세기의 새로운 세계를 열수 있는 기술이다.

21세기 주요 국가과제가 나노프로브 기술에 주목하고 있는 것은 바로 이러한 이유 때문이며, 이것들의 실현 시기를 어떻게 앞당기는가 하는 것은 이제 과학기술자들의 어깨에 달려있다고 하겠다.

참고문헌

1. Binning, G., Rohrer, H., "Scanning Tunneling Microscopy," *Helvetica Physica Acta*, Vol. 55, pp. 726-735, 1982.
2. Binning, G., Quate, C. F., "Atomic Force Microscope," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 56(9), pp. 930-933, 1986.
3. Synge, E. H., "A Suggested Method for Extending Microscopic Resolution into the Ultra-microscopic Region," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 6, pp. 356-362, 1928.
4. Pohl, D. W., Fischer, U. Ch., Durig, U. T., "Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM)," *J. Microscopy*, Vol. 152(3), pp. 853-861, 1988.
5. Baur, C., Bugacov, A., Koel, B. E., Madhukar, A. et al., "Nanoparticle Manipulation by Mechanical Pushing: Underlying Phenomena and Real-time Monitoring," *Nanotechnology*, Vol. 9, pp. 360-364, 1998.
6. Beton, P. H., Dunn, A. W., Moriarty, P., "Manipulation of C₆₀ molecules on a Si Surface," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, pp. 1075-1077, 1995.
7. Jung, T. A., Schlittler, R. R., Gimzewski, J. K., Tang, H., Joachim, C., "Controlled Room-temperature Positioning of Individual molecules: Molecular Flexure and Motion," *Science*, Vol. 271, pp. 181-184, 1996.
8. Stroschio, J. A., Eigler, D. M., "Atomic and Molecular Manipulation with the Scanning Tunneling Microscope," *Science*, Vol. 254, pp. 1319-1326, 1991.
9. Cuberes, M. T., Schlitter, R. R., Gimzewski, J. K., "Room-temperature Repositioning of Individual C₆₀ molecules at Cu Steps: Operation of a Molecular Counting Device," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 69, pp. 3016-3018, 1996.
10. Crommie, M. F., Lutz, C. P., Eigler, D. M., "Confinement of Electrons to Quantum Coralls on a Metal Surface," *Science*, Vol. 262, pp. 218-220, 1993.
11. Lyo, I.-W., Avouris, P., "Field-induced Nanometer to Atomic-scale Manipulation of Silicon Surface with STM," *Science*, Vol. 253, pp. 173-176, 1991.
12. Dagata, J. A., Schneir, J., Harary, H. H., Evans, C. J., Postek, M. T., Bennett, J., "Modification of Hydrogen-passivated Silicon by a Scanning Tunneling Microscope Operating in Air," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 56, pp. 2001-2003, 1990.
13. Shiracashi, J., Matsumoto, K., Miura, N., Konagai, M., "Single-electron Transistor with Nb/Nb oxide System Fabrication by Atomic Force Microscope Nano-oxidation Process," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 36, pp. 1257-1260, 1997.
14. Matsumoto, K., Ishii, M. et al., "Room temperature operation of Single Electron Transistor Made by the Scanning Tunneling Microscope Nanooxidation Process for the TiOx/TiO system," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, pp. 34-36, 1996.
15. McCord, M. A., Pease, R. F., "A Scanning Tunneling Microscope for Surface Modification," *J. Phys. Colloq.*, Vol. 47, pp. 485-491, 1986.
16. Sohn, L. L., Willet, R. L., "Fabrication of Nanostructures Using an Atomic Force Microscope-based Lithography," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, pp. 1552-1554, 1995.
17. Irmer, B., Blick, H., Simmel, F., et al., "Josephson Junctions Defined by a Nanoplough," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, pp. 2051-2054, 1998.
18. Carpick, R. W., Salmeron, M., "Scratching the Surface: Fundamental Investigations of Tribology with Atomic Force Microscopy," *Chem. Review*, Vol. 97, pp. 1163-1194, 1997.
19. Hamin, H. J., Terris, B. D., Fan, L. S., et al., "High-density Data Storage Using Proximal Probe Techniques," *IBM J. of Res. and Dev.*, Vol. 36, pp. 681-699, 1995.

20. Soh, H. T., Guarini, K. W., Quate, C. F., "Scanning Probe Lithography," Kluwer Academic Publishers, 2001.
21. Park, S. W., Soh, H. T., Quate, C. F., Park, S.-I., "Nanometer Scale Lithography at High Scanning Speeds with the Atomic Force Microscope Using Spin On Glass," Appl. Phys. Lett., Vol. 67 pp. 2415-2417, 1995.
22. Piner, R., Zhu, J., Xu, F., Hong, S. and Mirkin, C., "Dip-pen Nanolithography," Science, Vol. 283, pp. 661-663.
23. Hong, S., Mirkin, C. A., "A Nanoplotter of Soft Lithography with Both Parallel and Serial Writing Capabilities," Science, Vol. 288, pp. 1808-1811, 2000.
24. Ivanisevic, A., Mirkin, C. A., "'Dip-Pen' Nanolithography on Semiconductor Surfaces," J. Am. Chem. Soc., Vol. 123, pp. 7887-7889, 2001.
25. Yatsui, T., Kouroggi, M., Ohtsu, M., "Increasing Throughput of a Near-field Optical Fiber Probe over 1000 Times by the Use of a Triple-tapered Structure," Appl. Phys. Lett., Vol. 73, pp. 2090-2092, 1998.
26. Lieberman, K., Shani, Y., Melnik, I., Yoffe, S., Sharon, Y., "Near-field Optical Photomask Repair with a Femtosecond Laser," J. Microscopy, Vol. 194, pp. 537-541, 1999.
27. Jiang, S., Ichihashi, J., Monobe, H., Fujihira, M., Ohtsu, M., "Highly Localized Photochemical Process in LB films of Photo Chromatic Material by Using a Photon Scanning Tunneling Microscope," Optics Communications, Vol. 106, pp. 173-177, 1994.
28. Sun, S., Chong, K. S. L., Leggett, G. J., "Nanoscale Molecular Patterns Fabrications by Using Scanning Near-Field Optical Lithography," J. Am. Chem. Soc., Vol. 124, pp. 2414-2415, 2002.