

차세대 나노형상 측정장비 - AFM

이 글에서는 나노레벨 핵심 측정 장비인 원자현미경의 원리와 개발 동향에 대해 간단히 소개한다.

박 준 호 / 아주대학교 기계공학부, 교수

e-mail : jpark53@ajou.ac.kr

개 요

불과 20여 년 전까지만 해도 원자나 분자 같은 나노 세계는 너무 미세해서 어떠한 측정장치로도 측정할 수 없는 미지의 영역이었다. 그러나 원자현미경(AFM : Atomic Force Microscope)이 발명되면서 이러한 나노세계를 탐험할 길이 열렸다.

원자현미경의 시초는 1981년에 IBM 연구소의 Binnig과 Rohrer에 의한 발명된 STM(Scanning Tunneling Microscope)이다. STM은 두 원자가 충분히 가까워졌을 때 두 원자가 닿지 않아도 전류가 흐르는 현상을 이용하여 표면형상을 측정하는 원자현미경이다. 이렇게 전류를 흘려서 측정하기 때문에 STM은 도체 시료만을 측정할 수 있었다. 이러한 도체만을 측정할 수 있다는 시료의 한계를 극복한 반도체 시료도 측정할 수 있는 주사(scanning) 방식의 현미경인 AFM(Atomic Force Microscope)가 1986년에 Stanford의 Quate 교수팀에 의해 고안되었고 '90년대에 이르러 본격적으로 산업화되었다. 시료의 제한으로 인해 STM방식은 거의 상용화되지 못 하였고 AFM 원리의 SPM(Scanning Probe Microscope)이 상용화되었다.

주로 사용되는 분야는 실험실 수준의 연구용에서부터 산업용으로 LCD, 반도체 측정, 검사 공정까지 다양한 분야에 주로 분석 및 측정 기기로 사용되고 있다. 연구용으로 연마된 광학렌즈나 살아있는 생체의 두께나 형태, 굴곡도 측정에서부터 천연 광석의 표면분석에 이르기까지 나노 스케일의 정밀도가 요

구되는 곳에 활용되고 있다.(그림 1)

산업용으로는 반도체의 표면 형상 계측, 결점(defect) 분석, 콤팩트 디스크, 자기 디스크나 광자기 디스크 등에 쓰인 비트(bit)의 형상 검사 등에 쓰이고 있으며 반도체 및 FPD(Flat Panel Display)의 인라인(in line) 측정장비로도 활용되고 있다.

SIA(Semiconductor Industry Association)의 International Technology roadmap for Semiconductor에 발표되어 있듯이 반도체산업에서는 원자현미경을 중요한 차세대 정밀 계측 장비로 인정하고 있다. 원자현미경은 진공 상태나 대기 중뿐만 아니라 액체 내에서도 측정이 가능하므로 살아있는 세포 내의 구조나 세포 분열 등 바이오 산업 분야에서의 활용의 증대가 기대된다. 원자현미경은 관찰, 측정에 그치지 않고 가공, 조작(handling)의

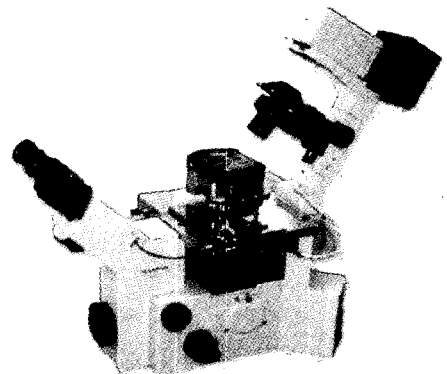


그림 1 Asylum Research 사의 AFM 장비

기능도 할 수 있어 나노로봇, 나노리소그래피, 나노머시닝, 나아가 분자의 합성 등의 연구에 활용될 것이다.

구조 및 기술

AFM방식의 SPM은 그 이름에서 알 수 있듯이 탐침과 시료 사이에 작용하는 힘을 이용하여 표면형상을 측정한다.

AFM은 탐침시스템(probing system)과 탐침을 움직이는 나노 분해능의 스캐너, 그리고 시편을 근사적으로 접근시키는 장치(coarse positioning system)로 구성된다. (그림 2)

탐침시스템은 캔틸레버(cantilever)와 탐침으로 구성된다. 캔틸레버와 탐침은 시료표면에 작용되는 힘이나 궁극적인 AFM의 수평 분해능을 결정하기 때문에 AFM에 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 초기의 탐침은 피라미드형으로 제작되었으나 이미지 왜곡현상이 심하여(콘볼루션효과가 커서), SEM보다 실용성이 떨어졌다. 그래서 탐침의

끝부분이 구 형인 것을 사용하여 콘볼루션효과를 제거하였으나 CD(Critical Dimension)가 200nm 이하이면 측정이 거의 불가능 하였다. 최근에는 탐침의 끝부분을 식각하여 그림 3(b)와 같이 제작하기도 한다. 탐침과 캔틸레버는 서로 결합된 형태로 제작되고 이는 사진 평판 기술을 이용하여 실리콘이나 질화 실리콘으로 만들어진다. V 모양의 캔틸레버가 수직 방향의 변화에 대해서 저항을 적게 받으므로 가장 널리 이용된다. 통상적으로 길이 100~200 μ m, 넓이 40 μ m, 두께 0.3~2 μ m이다.

AFM에서 캔틸레버의 변위 측정은 초기에는 STM의 방식과 비슷하게 터널전류를 이용하는 방식이었으나 현재는 레이저를 사용하는 광간섭 방식과 광지레 방식의 변위 검출방법이 사용된다. 그 중 현재는 광지레 방식의 변위 검출방법이 많이 쓰이고 있다. 광지레 방식의 사용에서 초기의 포토다이오드는 높이 변화만을 검출하였다. 그러나 현재의 포토다이오드는 높이뿐만 아니라 수평 방향의 변위도 동시에 검출 할 수 있다. 상하로 나누어진 포토다이오드가 수직방향변위를 측정하고 좌우로 나누어진 포토다이오드가 수평방향의 변위를 측정한다.

주사방식은 탐침스캐닝방식과 피측정물스캐닝방식이 있으며 용도에 따라 선택한다.

탐침스캐닝방식의 경우, 스캐너는 탐침을 x,y,z 방향으로 움직이는 장치를 말한다. 스캐너는 PZT(의 조합으로 제작되는데 PZT는 전압이 가해질 때 이것에 의해 크기의 변형이 일어나고 역으로 물리적 변형력을 소자에 가하면 소자 양단의 전극 사이에 전압이 유도되는 소자이다. 통상의 탐침스캐닝방식의 스캐너는 구조가 단순한 원통형을 많이 사용하였다. 원통형 구조의 스캐너는 수평방향으로는 수 nm에서 100 μ m까지 스캔이 가능하며, 수직방향으로는 sub-nm에서 약 10 μ m까지의 높이차를 측정할 수 있다.

피측정물 스캐닝방식의 경우는 탐침을 측정하고자 하는 수평 방향위치에 위치시키고 수평 방향의 스캔을 하는 장치로 나노레벨의 정밀 위치 제어가 가능한 나노스테이지가 요구된다. 나노스테이지는 정밀한 위치 제어를 위해 단일 재료로 만들어지고 재료의 탄성영역 안에서 거동하는 유연체 메커니즘을 사용한

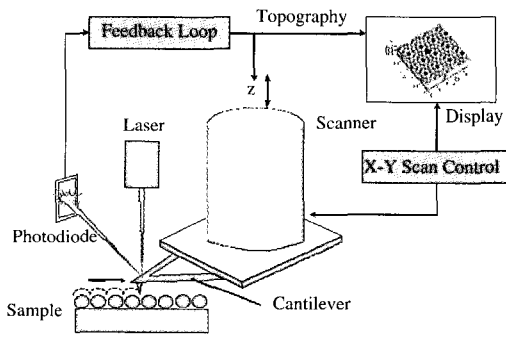


그림 2 AFM의 구조

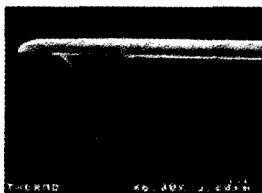


그림 3 탐침의 SEM 이미지

다. 나노스테이지는 PZT로 거동이 되며 열변형에 의한 오차를 최소화하기 위해 대칭적인 구조로 만들어진다.

AFM이 다양한 산업분야의 측정에 대응하기 위해서는 고성능의 나노스테이지 개발이 필요하게 되었으며, 특히 반도체 및 FPD 산업의 경우, 고정밀 스테이지, 빠른 스캔 속도, 무거운 측정물을 위한 고강성 스테이지, 대변위 스테이지 등의 개발이 필요하다.

시료나 탐침을 정확한 측정위치까지 이송시키고, 측정위치의 정밀제어를 위해서는 고정밀 위치제어용 센서가 필요하다. 대변위용 측정은 고정밀 리니어스케일이나 레이저 인테페로미터를 사용하여 측정한다. 레이저는 미터 표준에 직접 소급이 되고, 앤코딩(encoding) 방식으로 긴 거리를 측정하며, 파장이 sub- μm 이기 때문에 고분해능을 얻을 수 있는 등 길이 측정기가 갖추어야 할 많은 장점들을 갖추고 있다. 소변위 측정은 보통 나노 분해능급의 정전용량식 센서가 사용되고 있다.

AFM의 측정 모드는 크게 세 가지가 있다. 먼저 탐침이 시료와 접촉하여 표면을 스캐닝하는 접촉 모드가 있다. 접촉 모드는 AFM에서의 척력을 사용하여 측정된다. 연질 시료에 대해 접촉 모드를 사용하여 측정할 경우 시료의 표면에 손상을 가할 수도 있다.

탐침이 시료와 접촉하지 않고 표면을 스캐닝하는 비접촉 모드가 있다. 비접촉 모드는 원자간의 인력을 이용하여 표면형상을 측정한다. 비접촉 모드의 경우 캔틸레버의 변형이 접촉 모드보다 훨씬 적어서 캔틸레버의 변위를 측정하기 어려워 캔틸레버를 고유진동수로 공진시켜 캔틸레버에 작용하는 인력에 의해 공진주파수나 진폭이 변화하는 것을 측정하여 표면형상을 측정한다. 접촉 모드와는 달리 연질시료일지

라도 표면에 손상을 주지 않고 측정이 가능하다.

탭핑 모드는 접촉 모드와 비접촉 모드의 장점을 혼합하여 만든 방식이다. 캔틸레버를 공진주파수로 진동시키면서 표면을 가볍게 두드리면서 진동수나 진폭의 변화를 측정하여 표면 형상을 얻는다. 이 탭핑 모드가 AFM 세 모드 중 가장 선명한 영상을 얻을 수 있다.

그림 4에 세 모드의 CD측정을 보여주고 있다. 앞에서 말하였듯이 접촉 모드의 경우 CD에 손상을 줄 수도 있고 측정 역시 부정확하게 되는 경향이 있다. 비접촉 모드는 CD에 손상을 주지는 않으나 형상이 부정확하게 측정될 수 있는 있다. 그에 반해 탭핑 모드의 경우 CD에 손상을 주지 않으면서 비교적 정확한 형상을 측정하고 있다.

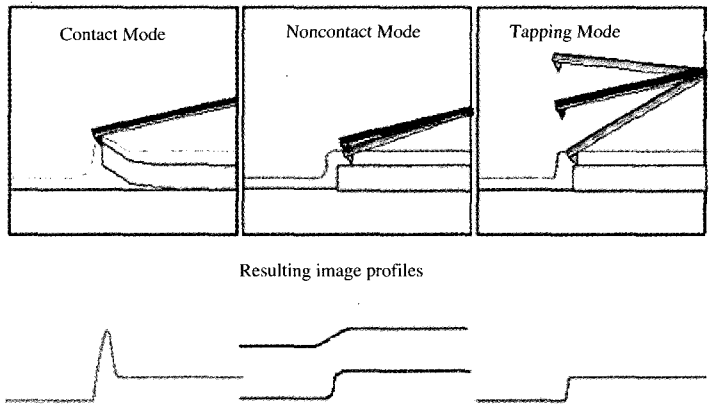


그림 4 AFM의 모드

기타 AFM

AFM을 이용하면 표면의 형상을 측정하는 경우 이외에도 탐침과 시료의 성질을 조작하여 여러 가지 정보를 얻을 수 있다. 몇 가지 예를 들면 표면의 마찰력을 측정하는 LFM(Lateral Force Microscope), 시료의 경도를 측정하는 FMM(Force Modulation Microscope), 시료의 탄성 및 점성 등을 재는 PDM(Phase Detection Micro-

scope), 자기력을 재는 MFPM(Magnetic Force Microscope), 시료의 전기적 특성을 재는 EFPM(Electrostatic Force Microscope) 등이 있다. 이 외에도 탐침으로 원자를 직접 움직여 가공하는 나노리소그라피가 있다.

개발 동향

AFM을 산업용으로 활용하기 위해서는 광학장비에 비해 느린 스캔 시간, 좁은 측정대역 그리고 3차원 형상 측정 등 AFM 시스템자체 개발 과제와 산업용 측정장비로서 신뢰성 확보를 위한 정밀 환경 제어 문제가 해결되어야 한다.

고속스캔을 위해서 기존의 PZT 구동기 대신 MEMS 공정을 이용한 구동기가 개발되고 있으며, 고정도 실현을 위해서 기존의 실리콘이나 진화 실리콘 대신 탄소나노튜브(CNT : Carbon Nano Tube)를 사용하는 방법이 있다. CNT의 경우 직경이 수nm에 불과하므로 훨씬 높은 고정도의 측정값을 얻을 수 있다.

반도체 CMP 공정에 필요한 측정에서는 수mm

대의 광대역 측정이 요구되며 이러한 광대역 측정을 위해서는 고정밀 프로파일링 스테이지의 개발이 필요하다.

산업용 특히 반도체나 디스플레이산업 분야에서 AFM이 공정설비로 사용이 되는 경우, AFM은 24시간 항상 측정환경이 같도록 제어되어야만 측정값의 신뢰성이 보장된다. 환경 제어 중에서 특히 어려운 분야는 진동으로, 특히 외부로부터의 진동이나 음향의 영향을 최소화하여야 측정 정도 및 신뢰도를 향상시킬 수 있다. AFM은 nm 단위의 분해능을 가지기 때문에 작은 진동이나 소음 등에 매우 민감하다. 바닥을 통해 들어오는 um 크기의 저주파 진동은 측정에 매우 심각한 영향을 주기 때문에 효과적으로 차단하여야 한다. 그 외에도 열이나 먼지 등에도 매우 민감하므로 섬세한 온도, 습도 제어도 필요하다.

대부분의 산업용 측정의 경우 자동 측정이므로 탐침의 마모의 모니터링이 중요하며, 탐침 마모에 따른 측정값의 변화를 최소화할 수 있다.

기존 탐침의 경우 탭핑 모드를 사용, 접촉방식에 비해 탐침의 마모를 최소화할 수 있으나, 탐침의 제

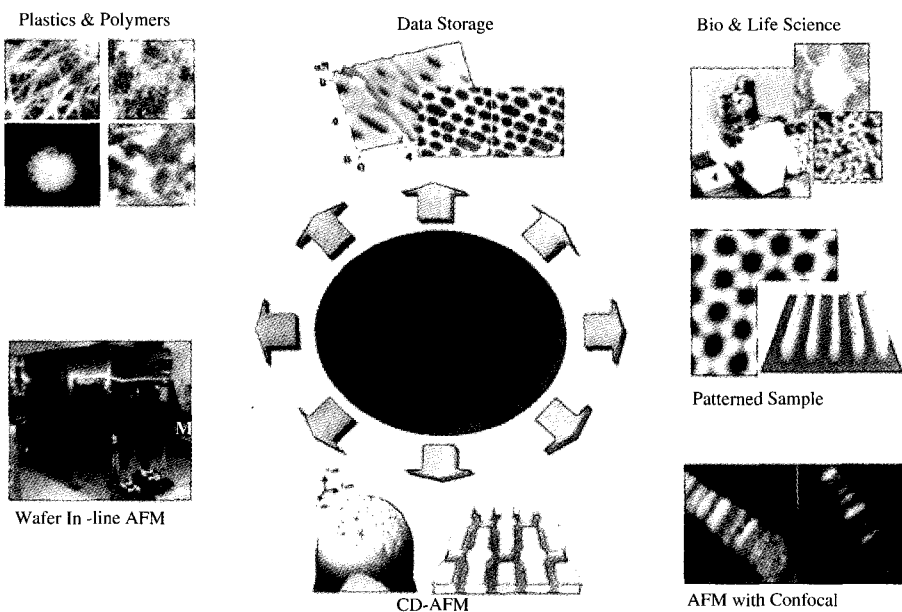


그림 5 AFM의 응용 분야

작공정상의 한계로 분해능은 제한될 수밖에 없었다. 향 후 CNT를 이용한 탐침 활용 기술이 실용화되면 마모문제와 분해능 문제가 다 해결되리라 기대한다.

기존의 원자현미경의 탐침은 형상이 피라미드나 원추 형태이기 때문에 CD 측정에 한계를 가지고 있다. CD를 측정하기 위해서는 CD 면에 대해서도 거리를 측정할 수 있어야 한다. CD면을 측정하기 위해서는 팁을 상하뿐만 아니라 좌우로도 진동시켜 팁과 CD면의 거리를 측정하여야 한다. 그러나 기존의 팁은 상하방향 즉 Z축 방향의 거리를 측정하기에 적합하도록 되어 있다. CD를 측정하기 위해서 여러 형상의 팁이 개발되고 있다. 그 예를 들자면 구형이나 장화형으로 만든 팁이 있다. 이러한 모양의 팁을 이용하면 좌우진동에 대해서도 거리에 따라 특징적인 주파수 변화이나 변위 변화가 있어서 CD를 측정할 수 있다.

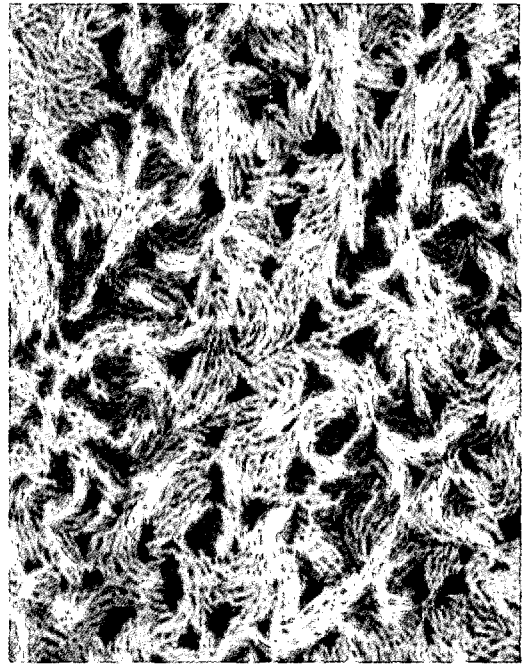
응용 분야

앞에서도 언급하였듯이 원자현미경은 보다 정밀한 측정-나노 스케일의 측정이 필요한 모든 곳에 사용된다. SPM의 초기에는 박막 작업에 한정적으로 사용되었으나 최근에는 응용 범위가 크게 확대되어 초미세 패턴을 얻기 위한 리소그라피와 에칭과 클리닝 공정의 표면분석, 반도체 장비의 dopant 분석 등에 이용되고 있다. 표면에서의 원자제어와 그의 영상화가 가능함을 들 수 있을 것이다. 그 중에서 대표적인 사례를 들면 다음과 같은 것들이 있다.(그림 5)

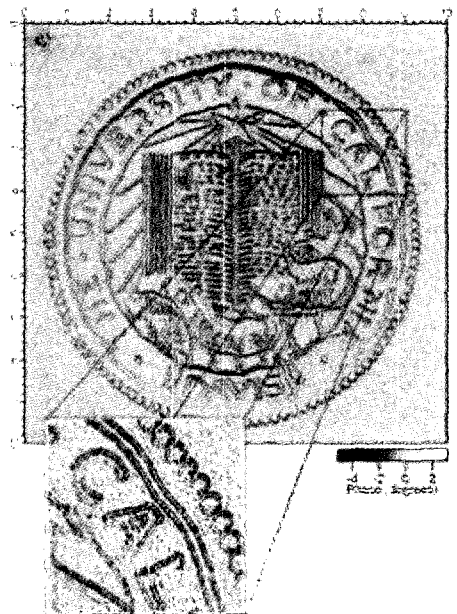
먼저 산업용의 대표적인 분야는 반도체 분야이다. 반도체 분야는 보다 높은 처리 속도와 고집적화를 추구하고 있으며 이러한 추세에 맞추어 반도체 디바이스의 분석장비로서 높은 해상도를 위한 분석장비가 요구되고 있다. 특히 높은 공간 분해능 분석장비의 하나로서 원자현미경이 상용화되고 있다.

현재까지 도체 시료의 제한으로 그 사용이 극히 제한되었던 생물학 분야에서 부도체 측정이 가능하고 진공이 아니라 물속과 같은 생리학적 환경에서도 시료의 다른 준비 없이 측정 가능한 AFM은 SPM 중 가장 성공적인 생물학적 도구로 여겨지고 있다.

또한 AFM은 3차원 이미지를 형성할 수 있을 뿐



(a) coblock polymer



(b) etching on polycarbonate

그림 6 AFM 응용 예

아니라 시료에서 얻을 수 있는 다른 요소들을 형상화 하는 도구로서도 많이 쓰이고 있다.