

## Scanning Tunneling Microscope와 Atomic Force Microscope의 원리와 응용

김 풍 작

주식회사 다이아(구 동일교역)

### Principle and Applications of Atomic Force Microscope & Scanning Tunneling Microscope

Poongzag Kim

D. I. Corporation, Seoul 135-010, Korea

#### 1. 서론

현대의 반도체 산업은 고집적화로 치닫고 있다. 이미 sub-micron 소자가 상업적으로 개발 판매되었으며, 현재에도 더 작은 소자를 만들기 위해 연구와 개발이 진행되고 있다. 소자의 크기가 미세해지면 질수록 이를 측정, 분석할 수 있는 분석 기기의 개발이 절실히 요구되고 있다.

광학현미경은 근세로부터, 학문과 산업의 발달에 지대한 기여를 해 왔다. 그러나 광학현미경은 가시광선의 굴절현상을 이용하고, 광학적 렌즈를 사용하기 때문에 그 해상도에 한계가 있다. 최적의 조건에도 굴절 한계 이하의 해상도는 가질 수 없다(보통 수 micron 정도). 이에 전자의 파동성을 이용한 주사 전자현미경(SEM : scanning electron microscope)이 급세기 전반기에 개발되었다. 주사 전자현미경은 source에서 생성된 전자를 전기적 또는 자기적 렌즈를 통하여 굴절, 침적하고 이를 전도성 시편 위에 산란시킨 후 이 시편에서 나오는 2차 전자, 전반사된 전자 등을 선택하여 물체의 기하학적 구조를 측정한다. 이 현미경의 경우 그 해상도는 전자선의 초점에서의 크기, space charge의 영향, 2차 전자의 발생 영역의 크기에 비례한다. 최적의 조건일 경우, 그 해상도는 약 수백 angstrom까지 얻을 수 있다. 그러나 SEM은 수평 해상도에 비해 수직 해상도가 훨씬 뒤떨어지고 시료를 코팅해야 한다는

단점이 있다. 투과 전자현미경(TEM : transmission electron microscope)은 전자선을 이용하여 얇은 시료를 투과하는 전자선을 측정하여 그 상을 얻는데, 현재 초기 전자 에너지가 100~400KeV인 장비가 주종을 이루고, 특수 시설에는 1MeV TEM이 사용되고 있다. 이 현미경은 여러 초점층(lens)을 사용하여 격자상(angstrom 해상도)을 얻을 수 있으나 시료가 특수하게 준비된 경우에만 가능하다.

STM(scanning tunneling microscope)은 현미경과 달리 양자역학적인 전자의 tunneling 현상을 이용하여, tip이 시료에서 수 angstrom 정도 떨어진 상태에서 시료의 한 영역을 주사하면 feedback(되먹임) 회로를 통하여 tip과 시료 사이의 터널링 전류가 일정하게 유지된다. 이 때, 일정한 전류를 유지하도록 역(negative) 되먹임 회로가 발생시키는 신호(터널링 전류의 변화)를 data로서 컴퓨터에 기록하고 이 data로 시료의 표면 구조를 그리게 되어 표면의 구조를 원자적 배율로 측정하는 것이 가능하다. 그러므로 STM은 어떤 현미경보다 우수한 해상도를 가지고 있으며, 원자를 직접 관찰할 수 있는 STM이 발명된 후 표면과학, 전기화학, 화학반응, 재료공학, 전자공학 등에 획기적인 진보를 가져왔다.

또한 최근에는 원자 상호간의 힘을 이용하여 표면을 분석하는 AFM(atomic force microscope)이 발명되었다. 시료의 국소적인 원자와 탐침 끝에 달려 있는 원

자 사이의 힘을 이용하기 때문에 시료의 전도성에 관계 없이 도체, 반도체, 자성체, 유전체 등의 거의 대부분의 시료 등을 공기 중에서 쉽게 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 또한 최근에는 생물학적(biological) 시료와 같이 부드러운 시료도 관찰하고 있다. 시료를 scan하는 동안 cantilever라는 아주 작고 부드러운 스프링에 달려 있는 tip의 원자와 시료의 원자들 사이에 작용하는 힘의 변화에 따라서 cantilever가 휘게 된다. 따라서 이러한 cantilever의 힘을 적절한 방법으로 측정하여 전기적인 신호로 변환한 다음, 이 신호를 tip과 시료 사이의 거리를 일정(cantilever의 휨이 일정)하게 유지하도록 되먹임하면 STM과 마찬가지로 시료 표면에 대한 3차원적인 정보를 얻을 수 있다.

## 2. STM(Scanning Tunneling Microscope)

STM은 1981년 스위스의 Rhorer, Binning 박사가 개발한(이 발명으로 1986년 노벨 물리학상 수상) 것으로, 기존의 다른 현미경과는 달리 양자역학적인 전자 터널링을 이용하여 표면의 기하학적 전기적 구조를 원자적 배율로 측정할 수 있다. 지난 10년간 그 성능에서의 월등함이 증명되어 왔음은 물론, 파생된 기술로 인하여 여러 분야에서 nano scale의 과학 기술의 장을 열게 하였다. STM은 진공, 액체, 대기 중에서 작동이 가능하다. STM의 원리, 측정 방법 및 기기 구성에 대해 간략히 기술하고자 한다.

### STM의 측정 원리

양자역학에 의하면 전자는 표면에서 입자와 파동으로 행동한다. 이런 특성으로 인하여 금속 표면에서 전자 구름을 형성하게 된다. 표면에서 거리가 멀어질수록 전자 구름의 밀도가 지수함수적으로 떨어짐을 알 수 있다. STM의 경우 다른 현미경과 달리 양자역학적 전자터널링 현상을 이용하여 표면의 구조를 원자적 배율로 측정이 가능하다. 양자역학적 현상의 하나인 터널링 현상은 전자가 두 도체(tip과 시료 표면) 사이의 전위 장벽을 확률적으로 통과하는 현상을 말한다. Tip과 시료의 거리가 매우 가까울 때(수 Å) tip과 시료 표면 사이에 전압을 인가하면 터널링 현상이 일어나게 된다. 일반적으로 bias 전압은 시료가 금속인 경우 수 millivolt 이상, 반도체의 경우 수 volt 정도가 사용되

는데, 시료와 tip이 수 Å 정도 떨어져 있는 경우, 터널링 전류는 수백 pA 내지 수 nA 정도 된다. 또한 tip과 시료 표면의 거리가 1Å 변하면 터널링 전류는 10배 정도 바뀐다. 터널링 전류를 일정하게 유지(tip과 시료 표면 간의 거리를 일정하게 유지)시키면서 일정 영역을 주사하면, 터널링 전류를 일정하게 유지시키기 위해 piezo scanner에 인가된 값을 동시에 컴퓨터에 받아들여 시료에 대한 image를 얻을 수 있다. 이러한 topography와 함께 STM을 이용하면 spectroscopy도 가능하다. 즉 표면에 인가하는 전압의 변화에 따른 전류의 변화를 측정할 수 있다. 이의 자세한 원리는 여기서는 생략하기로 하고 참고문헌을 참조하기 바란다.

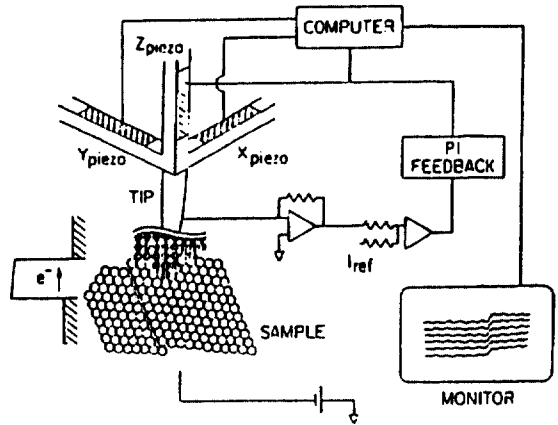


Fig. 1. STM의 원리

### STM 구동 및 측정 방법

STM이 원자적 분해능을 갖기 위해서는 tip 구동장치가 높은 공진 주파수와 낮은 Q factor를 가져야 할 뿐만 아니라 X, Y, Z 방향으로 tip이 움직일 때 충분한 정확도를 가져야 한다. 일반적으로 tip의 6구동장치는 X, Y 방향(Fine)과 Z 방향의 구동장치가 일체로 되어 있는 single tube scanner의 tip 접근 장치로 이루어진다. 일반적인 STM의 head 구조는 Fig. 2에 나타난다.

STM이 tip과 시료의 junction을 다루는 장치인만큼 tip은 매우 중요한 요소이다. Tip의 크기, 모양, 그리고 화학 성분은 STM의 분해능 뿐 아니라 측정되는 전기적 구조에는 지대한 영향을 끼친다. Tip은 일반적으로 기계적인 grinding이나 전기화학적 etching에 의

해 만들 수 있는데, 가장 널리 사용되는 재료는 텅스텐이다.

STM에서 원자적 분해능의 상을 얻기 위해서는 시료 표면의 불순물을 제거하고 평탄하게 준비하는 것이 중요하다.

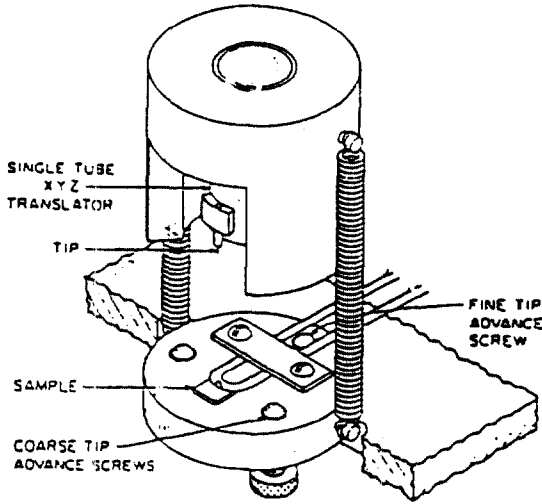


Fig. 2. 일반적인 STM head 구조

**STM의 일반적인 구성**

원자 정도의 해상도를 갖는 STM은 다음과 같은 부분으로 구성된다.

- 1) STM 장비를 제어하고 각종 정보를 처리하는 컴퓨터 관련 장치
- 2) Tip
- 3) Tip이나 시료 표면을 상대적으로 움직일 수 있는 tip 구동장치(scanner)
- 4) Tip과 시료를 서로 접근시키기 위한 장치
- 5) Tip과 시료 표면과의 거리를 일정하게 유지시키기 위한 역피드백(negative feedback) 장치
- 6) 방진 장치

STM은 기능별로 다른 여러 가지 module이 유기적으로 하나의 시스템을 이루어 동작한다. 기능별 module을 살펴보면,

- 1) Main computer(PC)
  - ADC, DAC, Graphic board
- 2) STM head
  - Tip, Scanner, Tip 접근 장치

- 3) 전자 제어 장치
  - Pre-amplifier
  - Negative feedback control module
  - X와 Y의 scan range 지정 module
  - Tip 접근 장치
- 4) 기타
  - Oscilloscope
  - 장진대
  - Tip etching 장치
  - Image 출력 장치

이상과 같은 기능을 가진 STM의 전체적인 기능별 구성도는 Fig. 3과 같다.

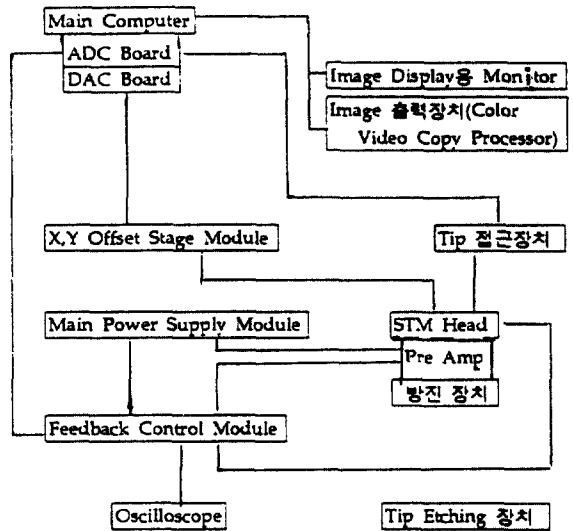


Fig. 3. STM의 전체적인 구성도

**3. AFM(Atomic Force Microscope)**

AFM(atomic force Microscope)은 1986년 Binnig, Quate, Gerber에 의해 개발되었으며, cantilever라는 작은 스프링 앞에 붙어 있는 tip과 시료 표면 사이에 작용하는 원자간의 힘을 이용하여 표면 구조를 영상화하는 기구이다.

AFM은 topography의 정사영인(projection) SEM상과 비교할 때 수직 분해능이 좋기 때문에 측정 도구로서 광학, 반도체, 자기 기록 산업에 많이 응용될 것으로 기대된다. AFM이 나타나기 전에 STM으로 이러한

산업에 응용하려는 시도는 있었지만 도체가 아닌 시료의 경우 coating을 해야 하기 때문에 많은 정보가 이로 인해 가려지게 되는 단점이 있었다. 반면에 AFM은 아무런 처리 없이 직접 nanometer 분해능의 3차원 굴곡을 측정할 수 있기 때문에 광디스크 stamper의 조사, 직접 회로 마스크의 전폭 측정 등의 다양한 응용 가능성을 가지고 있다. AFM은 또한 전하 분포, magnetic bit shape, magnetic domain, 표면의 우물두툼한 정도의 정량적인 측정과 박막 성장 morphology, gran size 등을 시각화하는 데, 적합하다. 이 외에도 마찰력, 마찰 전기, 탄성(elasticity), 표면 물리 등에 상당한 기여를 할 것으로 기대된다. 나아가 물이나 에탄올, 체액 등 다양한 환경 속에서 직접 실험할 수 있어 생체물리나 생명공학이 AFM을 이용하려는 시도가 이미 여러 곳에서 시도되고 있다. 측정 도구로서 뿐만 아니라 nanometer scale의 nanolithography, 유전자 조작 등에도 앞으로 무한한 응용 가능성을 내포하고 있다. AFM의 원리, 측정 방법 및 기기 구성에 대해 간략히 기술하고자 한다.

### AFM의 측정 원리

시료를 scan하는 동안 시료 표면의 원자와 cantilever라는 아주 부드러운 스프링에 달려 있는 tip의 원자들 사이에 작용하는 힘은 cantilever를 휘게 한다. 따라서 이러한 cantilever의 힘을 적절한 방법으로 측정하여 전기적인 신호로 변환한 다음, 이 신호를 tip과 시료 사이의 거리를 일정(cantilever의 휨이 일정)하게 유지하도록 역피드백하면 STM과 같이 시료 표면에 대한 3차원적인 정보를 얻을 수 있다.

고체 속의 원자들이 진동하는 진동수는 실온에서  $10^{13}$  Hz 정도이며, 원자의 질량이  $10^{-26}$  kg이라면 고체 속에 속박되어 있는 원자간의 스프링상수  $K$ 는  $m\omega^2 \approx 10\text{N/m}$  정도이다. 따라서 스프링상수가  $10\text{N/m}$ 보다 작은 부드러운 cantilever를 사용한다면 시료 표면을 손상시키지 않고 원자간의 힘을 측정할 수 있다. AFM에 이용되는 힘은 척력과 여러 종류의 인력인 Van der Waals 힘, 정전기적인 힘(electrostatic force), 자기력(magnetic force) 등이 있다. 간단한 힘에 대한 모형으로 Lennard-Jones 분자간의 상호작용은 식 (3-1)처럼 주어진다.

$$U(r) = \frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6} \quad (3-1)$$

여기서 A와 B : 실험적으로 구한 상수

r : 두 원자간의 거리

여기서 시료 표면과 tip 사이의 거리가 시료의 전자 파동함수와 tip의 파동함수가 겹쳐지게(overlap) 될 정도로 가까워지면 Pauli의 배타 원리에 의해 강한 척력( $r^{-12}$  에어존)이 작용하게 된다. 이 힘은 단거리 힘(short range force)이므로 국소적인 topography에 매우 민감하다. 실제로 원자 수준의 분해능을 얻으려면 이러한 척력을 이용한다. 한편, tip과 시료 사이의 거리가 10nm 정도로 떨어져지게 되면 이들 사이의 상호작용은 식 (3-1)의 두번째 항이 더욱 지배적인 효과를 미치게 된다. 따라서 인력인 van der Waals 상호작용을 하게 된다. 이것은 장거리 힘(long range force)이기 때문에 척력을 이용하는 경우보다 다소 수평 분해능이 떨어진다. Van der Waals 힘을 비롯한 대부분의 인력들은 척력에 비해 100배 정도 작기 때문에 직접적인 방법보다는 resonance enhancement method라는 AC 측정법을 이용한다.

### AFM의 동작 원리

AFM에서 가장 중요한 요소로서 이미지의 분해능을 결정하는 것은 tip과 cantilever라고 할 수 있다. Tip의 역할이 시료와의 힘의 상호 작용이라면, cantilever의 역할은 원자간의 힘을 외부 세계로 전달하는 것이다. Cantilever의 역학적인 성질은 스프링상수가 커야 한다. 이러한 상반되는 요구 조건을 모두 만족시키기 위해 cantilever의 크기를 아주 작게 줄이면 수백 KHz 정도의 높은 공명 주파수를 가지면서 스프링상수를 작게 만들 수 있다. 초창기에는 알루미늄 foil에 다이아몬드 tip을 붙여 사용하였으나 최근에는 Si이나 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>로 microfabrication한 것을 많이 사용한다. 보통 사용하는 스프링상수는 0.1에서 1N/m, 공명 주파수는 10~100KHz 정도이다.

Cantilever의 휨을 측정하는 방법에는 현재 beam deflection method가 가장 일반적이고 널리 쓰인다. Beam deflection method를 사용하려면 레이저 관련 장치가 필요하다. 작은 용량의 전력을 소비하는 레이저 diode가 필요하고 레이저 빔의 진행 경로를 위하여 focusing lens가 사용된다. Cantilever에서 반사된 레이저 빔은 PSPD(position sensitive photo diode)에 들어간다. PSPD는 bicell detector라고 부르며 두 부

분의 cell로 구성된다. PSD는 빛을 받으면 전류 출력을 낸다. 두 출력 전류는 STM에서 터널링 전류와 같은 역할을 한다.

Cantilever의 휨을 일정하게 제어할 수 있는 되먹임 장치는 STM과 마찬가지로 기능을 한다. AFM에서는 STM과 달리 입력이 둘이므로 이에 대한 고려가 있어야 한다. AFM의 되먹임 장치에서는 입력된 두 전압의 합과 차를 구하고 그 중 전압차를 STM의 입력 신호처럼 사용하여 되먹임을 한다. Fig. 4는 AFM의 원리를 나타낸다.

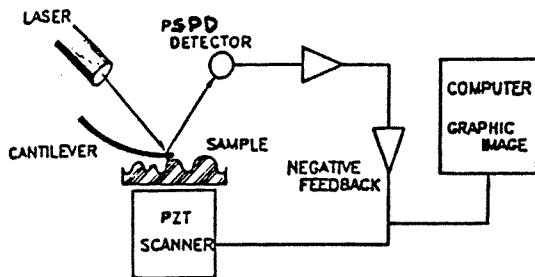


Fig. 4. AFM의 원리

**AFM의 일반적인 구성**

원자간의 힘을 측정하는 AFM은 다음과 같은 부분으로 구성된다.

- 1) AFM 장비를 제어하고 각종 정보를 처리하는 컴퓨터 관련 장치
- 2) 날카로운 tip이 달려 있는 부드러운 스프링(cantilever)
- 3) Tip이나 시료를 상대적으로 움직일 수 있는 scanner(대부분의 AFM은 시료를 움직인다).
- 4) Tip과 시료를 서로 접근시키기 위한 장치
- 5) Cantilever의 휨을 정확히 제어할 수 있는 역되먹임(negative feedback) 장치
- 6) 시료와 tip 사이에 작용하는 힘에 의한 cantilever의 휨을 측정할 수 있는 장치
- 7) 방진 장치

PZT scanner, inchworm, 방진 장치, 컴퓨터 관련 장치는 STM과 비교하여 별 차이가 없고 실제로 STM과 공용으로 사용한다. 이상의 기능을 가진 AFM의 구성도는 Fig. 5와 같다.

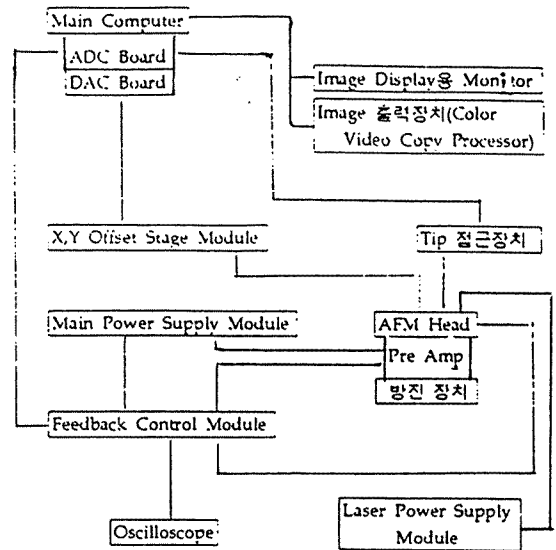


Fig. 5. AFM의 전체적인 구성도

**4. SOFTWARE 및 STM과 AFM의 성능 평가**

STM과 AFM은 제작 회사마다 다소 차이는 있을 수 있으나 일반적으로는 Microsoft Windows 3.1 환경에서 동작하도록 개발되었다. 개발된 프로그램을 사용하면 보통 256 color의 선명한 image를 얻을 수 있고 이 밖에 3D display와 zooming, cross section view 등의 기능이 있어 image의 처리도 사용자가 원하는대로 가능하다. Fig. 6은 국내 모 회사에서 개발한 STM과 AFM 프로그램의 실행 화면이다.

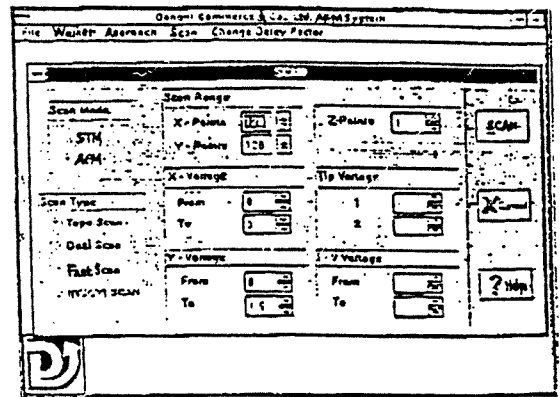


Fig. 6. STM과 AFM을 위하여 개발된 프로그램 실행 화면의 예

상압용 STM의 성능 분석은 보통 HOPG(highly oriented pyrolytic graphite)을 시료로 하는데, HOPG를 선택하는 이유는 시료의 원자적 구조와 전자 상태가 잘 알려져 있고, 층상 물질로 손쉽게 일정한 원자적 표면을 얻을 수 있으며, 대기 중에서 공기 분자의 흡착이 일어나지 않기 때문이다.

Graphite의 원자간 거리는 약 2.5Å이다. Fig. 7은 graphite의 scanning 결과이다. Scan range는 30Å × 30Å이고, 터널링 전류는 10nA이다. Tip voltage는 0.05V이다. 그림에서 보는 바와 같이 정확한 image를 얻으면 기본적인 성능시험이 되었다고 볼 수 있다.

상압용 AFM의 성능은 용도에 따라 여러 가지 다른 시료로 시험할 수 있으나 여기서는 optical grating으로 시험한 예를 보여 주고자 한다. Scanning 결과를 Fig. 8에 나타내었는데, 정확한 image를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

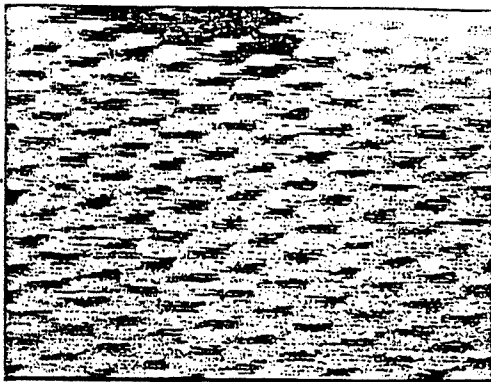


Fig. 7. Graphite의 STM image

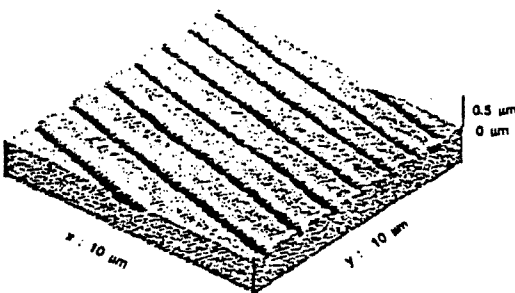


Fig. 8. Optical grating의 AFM image

Scanning 결과를 STM과 AFM에서 비교해 보면 제품마다 다소 차이는 있겠지만, 이 경우에는 approach 과정은 AFM이 쉽게 수행되었고 scanning 과정도 원자 수준의 해상도가 아닌 경우에는 AFM이 더 나은 데이터를 얻었다. AFM은 tip이 거의 시료와 닿아서 scanning을 수행하므로 tip이 충돌할 염려가 없고 초기 신호의 크기도 커서 나은 image를 얻은 것으로 사료된다.

5. 결론 및 향후 응용

상압용 STM은 반도체 미세 분석 장치 중 핵심적인 장비로서 반도체 sub-micron 소자 연구, 64M/256M DRAM 제조 기술, lithography 기술 향상에 기여할 수 있고, etching 관련 작업 후 결함 조사와 산화막의 두께 유지 등 현재 반도체 업계가 안고 있는 문제의 해결이 가능할 것으로 기대된다. 그러나 STM은 측정하는 시료의 표면이 도체이어야 분석이 가능하지만 AFM은 절연 물질도 분석이 가능하다. 그래서 단단한 시료를 분석하는 반도체, 재료 분야 외에도 이미 고분자, 생물학, 의학 등에서 AFM의 활용이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 응용 외에 근래에는 화학 분야에서 AFM의 활용이 두드러지게 부각되고 있다. 예를 들면 화합물의 COOH의 OH 또는 alcoholic OH기와 counter atom 사이에 작용하는 힘의 크기를 측정함으로써 반응 mechanism 및 kinetics를 연구할 수 있다. 결론적으로 말하면 AFM의 경우, 분석의 새로운 장르가 전개된다고 해도 과언이 아니라고 생각된다.

참고문헌

1. Y. Kuk and P. I. Silverman, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**, 165(1989).
2. Y. Kuk in "Scanning Tunneling Microscopy I" edited by H. J. Guntherodt and R. Wiesendanger, Springer Verlag, Berlin, 1992.
3. Y. Kuk in "Scanning Tunneling Microscopy" edited by J. A. Stroscio and W. I. Kaiser, Academic Press, New York, 1993.
4. B. Drake, C. B. Prater, A. I. Weisenhorn, S. A. Gould, T. R. Albrecht, C. P. Quate, D. S. Cannell, H. G. Hansma and P. K. Hansma, *Science*, **243**, 1586(1989).

5. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 120(1983).
6. Constant A, J. Putman, Kees O, van der Werf, Bart G, de Grooth, Niek F, van Hulst, Frans B, Segerink and Jan Greve, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**(3), 1914(1992).
7. M. E. Taylor, *Rev. Sci. Instrum.*, **64**, 154(1993).
8. F. Kulcsar, J. Amer, *Ceramic Soc.*, **42**, 343(1959).
9. C. M. Harris and C. E. Crede, "Shock and Vibration Handbook", McGraw-Hill, New York, 1976.
10. U. Hartmann, "10 Years of STM Proceedings of the Sixth International Conference on Scanning Tunneling Microscope, Part A", 59(1991).
11. C. P. Germano, *IRE Trans.*, **7**, 13(1956).
12. G. Binnig and D. P. E. Smith, *Rev. Sci. Instrum.*, **57**, 1688(1986).
13. Dror Sarid, "Scanning Force Microscope with Application to Electric, Magnetic and Atomic Force", New York Oxford, Oxford University Press, 1991.
14. P. K. Hansma, *IBM J. Res. Dev.* **30**, 396(1986).
15. Gabi Neubauer, Sidney R. Cohen, Gray M. McClelland, Don Horne, *Rev. Sci. Instrum.*, **61**(9), 2296 September(1990).
16. Ch. Gerber, G. Binnig, H. Fuchs, O. Marti, and H. Rohrer, *Rev. Sci. Instrum.*, **57**, 221(1986).