

주사형 터널링 현미경의 측정원리 및 응용



●1950년생.
●고체의 상전이 및 레이저 분광학을 전공하였으며, 원자수준의 측정 및 조작, 가공에 관심이 있다.

구 자 용

한국표준과학연구원 비파괴평가연구실



●1964년생.
●비선형 광학을 전공하였으며, 레이저이용 비파괴 검사 방법의 개발과 응용 및 STM의 이용 기술에 관심이 있다.

김 달 현

한국표준과학연구원 비파괴평가연구실

1. 머리말

1980년대 초반 취리히의 IBM연구소에서 개발한 주사형 터널링 현미경(scanning tunneling microscope, 이하 STM)은 반도체나 도체 표면의 개별 원자를 실제공간에서 비파괴적으로 식별할 수 있는 능력을 갖추었으므로 수십년 동안 논란의 대상이었던 물리학의 여러 문제들을 한꺼번에 해결하게 해주었다.⁽¹⁾ 비교적 간단한 구조와 강력한 성능으로 STM은 1980년대 이후 전세계로 급속히 전파되어 갔으며, 연구분야도 넓어져서 실리콘이나 갈륨비소 등의 반도체를 원자수준에서 조사하는 데서부터 화학, 생물학 등의 분야에까지 이용되고 있다. 1989년 경부터는 DNA의 구조를 STM으로 관찰한 연구들이 보고되고 있으며, 두 개의 물체가 접촉해서 미끄러질 때 두 물체 표면의 원자 결합의 파괴형태 등으로부터 마찰의 궁극적 의미와 원인을 밝혀내려는 시도 등도 행해지고 있다.

한편 20세기 후반에 들어서 급속히 발달해온 전자공업은 사회전체를 크게 변모시켰다. 그 변모의 핵심적인 요인들 중 하나는 단일 트랜지스터 생산에서 대규모 집적회로의 생산으로 발전해온 전자공업기술의 진보라고 할 수 있으

며, 세부적인 기술면에서 볼 때는 트랜지스터를 기본으로 하는 스위칭 소자의 집적화에 초점이 모아진다. 고집적화에 의해 각 소자의 소모전력의 감소와 생산원가의 절감 및 신뢰성의 향상이 대폭 이루어졌고, 또 신호처리의 고속화에 의해 성능이 월등히 높아졌다. 집적도의 향상과 신호 처리의 고속화는 앞으로도 계속될 것이며, 특히 고속화를 위해서는 다양한 반도체재료에 대한 연구와 새로운 개념의 양자소자에 대규모 투자가 되고 있다. 특히 최근들어 각광을 받고 있는 양자소자는 소자의 크기를 nm수준으로 줄임으로써 나타나는 전자의 파동성을 이용한 것으로 개별전자들의 산란이 줄어들고 신호전달경로가 짧아져 종래의 소자에 비해 엄청난 속도향상이 가능해지며, 미국, 일본 등에서는 이미 이의 시제품들이 발표되고 있다. 이러한 관점에서 차세대 전자소자를 만들기 위해서는 반도체 재료에서 허용될 수 있는 결합의 정도, 반도체와 금속의 접합부의 전기적 성질, 종류가 다른 반도체 간의 결합에 의한 성질 등이 모두 원자수준에서 연구되어야 하며 이를 위해서는 STM이 가장 강력한 연구장비로 전망된다.

현재의 컴퓨터를 기반으로 하는 정보처리의 개념에서 볼 때 모든 재료들의 성질이 파악되고 극미세 제조기술이 발달한 후 궁극적인 목

표는 몇 개의 원자로 구성되는 분자 크기의 스 위칭 소자를 만드는 것이다. 당초 표면분석장 치의 하나로 개발된 STM은 개별 원자를 구별 할 수 있다는 고분해능과 비접촉으로 인해 시 료에 손상을 주지 않는다는 이점 이외에도 탐 침에 강한 전기 신호를 가할 수 있어 필요에 따라 시료에 변형을 가할 수 있으며, 수년 전 부터 극미세 가공방면에 많은 연구가 행해지고 있다. 특히 최근에는 몇 개의 원자를 이동시키 거나 특정한 원자를 화학반응시켜 기체상태로 증발시키는 기술 등이 선을 보이고 있다. 여기 서는 STM의 기본 작동원리와 STM제작상의 제문제들을 살펴보고 이의 초정밀 측정 및 가 공에의 응용가능성 등을 알아보기로 한다.

2. 이론적 배경

종래의 광학현미경은 빛의 직진현상을 이용 한 것으로, 시료상의 다른 위치에서 출발한 빛 들은 렌즈를 통과한 후 서로 다른 화면상의 점 에 도달한다는 개념에 그 바탕을 두고 있다. 따라서 두 점 사이의 거리가 가시광의 파장의 영역으로 가까와지면 빛의 파동성에 의한 회 절현상으로 두점을 구별하기가 불가능해진다. 이에 따라 고배율을 얻기 위해서는 더욱 짧은 파장을 가진 파동을 사용해야 하는데 이를 위 해 고속의 전자빔을 사용한 것이 전자현미경 (SEM, TEM)이다. 이들 현미경들은 시편의 xy 평면상에 있는 서로 다른 점에서의 광학 적, 전기적성질은 구분할 수 있으나 같은 점에 서의 높이 차이에 의한 표면형상은 거의 구별 할 수 없다. 그러나 초정밀 부품의 성능에 직 접 영향을 주는 표면형상 및 표면거칠기 등을 측정하려는 요구에 따라 여러가지 기술들이 개 발되어 왔는데 현재 표면형상을 정밀하게 측정 하는 가장 좋은 방법으로는 그림 1과 같은 방 법이 일반적으로 받아 들여지고 있다.

즉 끝이 아주 뾰족한 탐침을 시료의 표면과 수직이 되게 세우고 시료의 표면과 탐침의 끝 부분 사이의 거리를 일정하게 유지시킨다. 그

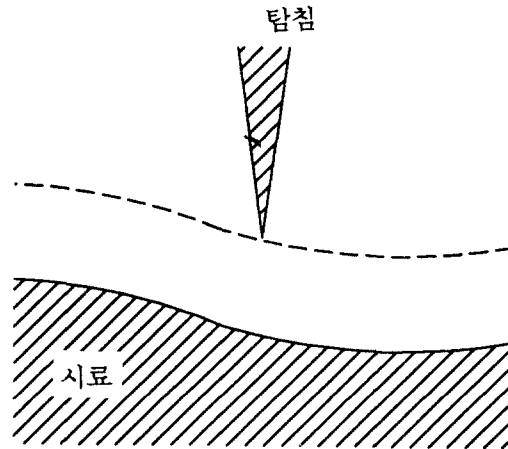


그림 1 탐침의 움직임을 통하여 표면 형상을 측정하 는 방법

다음 시료와 탐침 사이의 거리가 항상 일정하 게 유지되는 상태에서 xy 평면상으로 탐침을 수평이동 시킨다. 이 때 탐침은 시료표면의 바 로 아래점과 항상 일정한 거리를 유지하므로 실체는 시료의 표면 형상을 따라 움직이게 되 며 xy 평면상의 좌표에 대해 탐침의 움직임을 기록하면 시료의 표면형상을 얻을 수 있게 된 다. 측정기의 음성신호 재생방법도 이 범주에 속한다고 할 수 있다. 이때 시료의 표면과 탐 침 사이의 거리를 유지하는 방법에 따라 접촉 식과 비접촉식으로 구별되며 비접촉식에서도 여러가지 방법이 있을 수 있다. 또 탐침을 주 사하는 방법에도 여러가지가 있으며 높은 배율 을 위해서는 외부진동을 완벽하게 차단해야 하 고 엄격한 온도조절로 각 구성부품의 열팽창을 최소로 줄여야 한다.

현재의 STM과 거의 같은 원리를 사용한 장 치는 1970년대 초반 미국의 국립표준국 (NIST)에서 Young 등에 의해 개발되었다.⁽²⁾ 이 장치는 시료표면과 탐침의 거리를 측정하는 데 시료와 탐침 사이에 전압을 걸어줄 때 흐르 는 전류를 이용하였고 탐침을 주사하기 위하여 압전소자인 PZT($PbZrO_3$ 와 $PbTiO_3$ 의 고용체) 를 사용하였다. 그러나 외부의 진동차단을 완

벽히 못했고 또 전류도 STM에서와 같은 터널링 전류가 아니었기 때문에 거리측정의 정밀도는 nm 수준까지는 이르지 못했다.

그후 Binnig 등이 발전시킨 현재의 STM은 완벽한 진동차단과 터널링 전류의 채택으로 실리콘 표면의 개별원자를 구별하는데 성공했으며 원자배열을 실제공간(real space)에서 직접 관찰하기는 근본적으로 불가능할 것이라는 기존의 통념을 바꿔놓았다. 실제로 Binnig 등이 그들의 결과를 발표한 이후에도 몇 년 동안 이를 믿지 않는 사람이 많았다.⁽³⁾

2.1 터널링 전류

모든 움직이는 물체는 고유의 파동성을 가지고 있으며 그 파장(de broglie wave length)은 운동량에 반비례한다. 전자는 매우 가벼운 입자이므로 파동성이 두드러지게 나타나며 그 운동은 양자역학으로 기술된다. 1920년대에 체계가 형성된 양자역학은 그 전까지의 과학으로는 설명되지 않았던 많은 자연현상을 잘 설명하였고 그 때까지의 상식과 배치되는 여러가지 예언도 하였다. 그중 하나가 얇은 에너지 장벽을 입자가 뚫고 지나가는 터널링현상이다.

그림 2에서 오른쪽으로 움직이는 전자에 대해 전자의 운동 에너지보다 높은 에너지 장벽이 있을 경우 고전역학적인 개념으로는 전자는

장벽에 부딪혀 운동에너지와 정확히 같은 값을 가지는 반환점(turning point)에서 운동방향을 돌려 반대로 진행한다. 그러나 실제의 전자는 파동으로 진행하므로 반환점을 지나서도 얼마간 진행할 수 있으며 유한한 두께의 장벽을 완전히 뚫고 나갈 수 있는 확률은 항상 존재한다. 그림 1에서 금속시료와 금속 탐침을 가까이 접근시키면 이들 금속 내부의 전자가 느끼는 위치에 대한 에너지 장벽은 그림 2와 비슷하게 되며 이 때 약한 전압으로도 측정가능한 전류를 쉽게 흘릴 수 있다. 그림 2에서 접촉하지 않은 두 도체간에 흐르는 전류를 고전적 통계역학으로 설명을 시도할 수는 있다. 즉 한 개가 아닌 많은 수의 전자의 집단을 고려하고 그 집단의 평균 운동에너지를 그림 2와 같이 에너지 장벽보다 낮게 잡는다. 이 때 전자들의 운동에너지 분포에서는 평균치보다 매우 높은 값을 가지는 전자들이 반드시 존재하므로 이들 소수의 고에너지 전자들이 에너지 장벽을 뛰어넘는다고 생각할 수 있다. 그러나 장벽을 뚫고 지나가는 것과 뛰어 넘는 것은 본질적으로 다르며 양자역학이 기술하는 터널링은 전자의 파동성에 기인한다.

두 도체가 매우 가까이 있어서 그 사이의 터널링 전류를 측정할 수 있을 때 전류의 크기는 두 도체 사이의 거리와 걸어준 전압에 의해 아래의 근사식으로 표시될 수 있다.

$$I(V,r) = f(V) \exp(-\phi r) \quad (1)$$

여기서, $f(V)$ 는 두 도체 사이에 걸어준 전압의 함수, ϕ 는 두 도체의 재료에 의해 결정되는 상수, r 는 두 도체 사이의 거리를 나타낸다.

위의 식에서 터널링 전류는 거리에 아주 민감하다. 가령 두 도체 사이의 거리가 0.5nm일 때 전류가 1nA라고 하면 거리가 0.4nm로 0.1nm줄어들며 전류는 10배 정도의 증가를 보인다. 따라서 두 도체 사이의 터널링 전류를 일정하게 제어할 수 있으면 0.01nm보다 좋은 수직 분해능을 쉽게 얻을 수 있다. 또 두 도체중

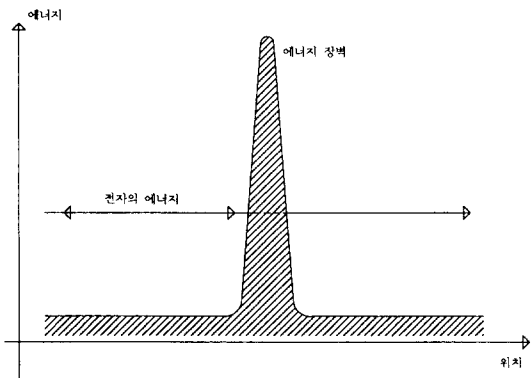


그림 2 전자는 파동성에 의해 얇은 에너지 장벽을 뚫고 지나갈 수 있는 유한한 확률값을 지닌다.

하나를 뺏족하게 언마된 탐침이라고 하면 탐침의 가장 끝 부분에 위치한 원자와 바로 뒤의 원자와의 거리는 0.1nm 이상이 될 경우가 많다. 이때 대부분의 터널링 전류는 탐침의 가장 끝의 원자를 통해 흐르고 탐침의 나머지 부분을 통해 흐르는 전류는 무시할 수 있을 정도이다. 따라서 탐침의 끝 부분의 곡률반경이 수십 nm 이상되는 탐침으로도 수평 분해능 0.2~0.3nm를 달성할 수 있다. STM의 높은 수직, 수평분해능은 위와 같은 터널링 전류의 특성 때문이다.

2.2 압전소자

압전특성을 가진 재료에 기계적인 응력을 가하였을 때 그 응력에 대하여 재료표면에 전하가 발생하며 역으로 전장을 가하였을 때는 변형이 발생한다. 대표적인 압전 재료로는 수정, BaTiO₃ 및 PZT 등이 있는데 현재 가장 많이 응용되는 재료는 PZT이다. PZT의 응용에는 초음파 진동자, 비파괴검사용 초음파 탐촉자, 점화장치, 세라믹 필터, 가속도 및 하중측정센서 등 각종센서류이다. 얇은 판이나 막대의 형태로 만들어진 PZT의 양쪽 전극에 분극방향으로 전압을 걸어 주면 PZT는 두께가 두꺼워지고 길이는 줄어드는 방향으로 변형이 일어나며 전압의 극성을 바꾸면 반대의 변형이 일어난다. 두께방향의 변형은 전압에만 관계되고 PZT의 두께나 길이에 거의 무관하며 길이방향의 변형은 아래의 근사식으로 표시된다.

$$\Delta L = CVL/D \quad (2)$$

여기서, C 는 비례상수, V 는 전압, L 는 전체길이, D 는 두께를 나타낸다.

참고로 길이 20mm, 두께 2mm인 PZT막대에 1V의 전압을 걸어주면 PZT의 조성에 따라 두께방향으로는 0.3nm전후, 길이방향으로는 수 nm의 변형을 갖는다. STM에서는 0.01nm의 정밀도를 달성하면서 동시에 시료의 넓은 관찰범위를 위하여 PZT의 길이방향의 변형을 이용한다.

3. STM의 구성

STM은 원자수준의 측정정밀도를 요구하기 때문에 실제로 제작하기 위하여는 다른 장치에서는 고려하지 않아도 좋을 몇 가지 주의하여야 할 것들이 있다. 아래에 STM의 제작을 위한 구체적인 설명과 함께 이들을 기술해 가겠다.

3.1 진동의 차단과 감쇄

STM으로 원자수준의 분해능을 얻기 위하여 가장 먼저 해야 할 일은 완벽한 외부진동의 차단이다. 초기에는 STM의 밀판을 2단계의 용수철로 매달았으나 현재는, 용수철은 1단계만 사용하고 그대신 밀판과 각 구성부품을 튼튼하게 만들어주는 방법이 주류를 이루고 있다. 그러나 감쇄장치가 없는 용수철만으로는 한 번 생긴 진동을 제거하기 곤란하므로 감쇄장치로 와전류(eddy current)의 방법을 응용한다. 이를 위해 STM의 밀판주위로 영구자석을 배치하고 2~3mm 떨어진 곳에 전기전도도가 큰 구리나 알루미늄 등의 금속판을 영구자석과 평행하게 외부지지대에 고정시킨다. 만약 밀판의 진동이 생기면 자석은 금속판에 와전류를 생성시키므로 밀판의 진동에너지가 소모되어서 진동은 빨리 줄어든다. 이 방법은 매우 효과적인 것으로 특히 진공상태에서 STM을 사용할 경우 다른 감쇄방법이 없으므로 모두 이 방법을 사용한다.

외부진동과 함께 STM자체에서 생기는 내부진동이 큰 문제가 된다. STM에서는 탐침을 시료의 표면위를 따라 xy 방향으로 규칙적으로 주사하므로 주사장치(scanner)에서 내부진동을 만들어 낸다. 만약 STM자체의 기계적인 공진 주파수가 낮은 경우 주사장치에서 발생하는 진동주파수의 영향으로 공진 모드가 크게 여기되어서 측정신호에 영향을 준다. 따라서 이러한 영향을 줄이고 자료수집시간을 단축하기 위해서는 STM자체의 공진주파수를 가능한

한 높여 주어야 한다. 이런 목적을 위하여 밑판과 그위에 고정되는 주사장치나 시료고정장치 등은 모두 작고 튼튼하게 만들어야 한다.

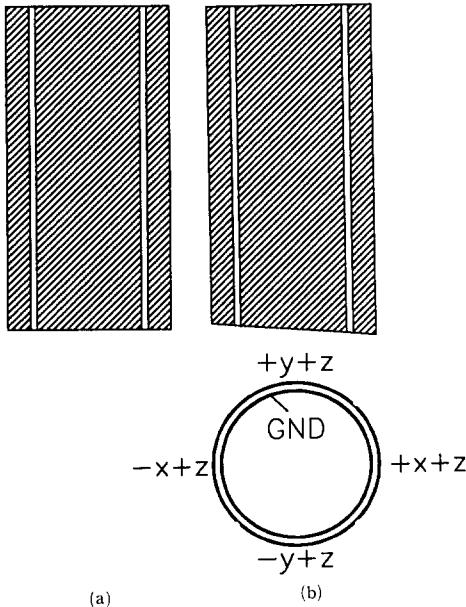
3.2 3차원 주사장치와 교정

시료표면의 형상을 따라 탐침을 그림 1과 같이 움직이면 3차원 주사장치(scanner)가 필요하다. 초기의 STM에서는 3개의 PZT막대를 직교하도록 만들고 그 만나는 지점에 탐침을 부착한 후 각각의 PZT에 전압을 걸어 3차원 주사를 하였다. 이 경우 막대기의 길이는 20 mm 수준이고 전압에 의한 각 막대기의 변형은 $1\mu\text{m}$ 를 넘지 않았으므로 직교성은 좋은 편이었다. 그러나 현재는 PZT의 얇은 튜브형태가 많이 사용되는데 PZT 튜브의 바깥 전극을 그림 3(a)와 같이 4부분으로 나누어 사용할 수 있다. 그림 3(b)와 같이 여러 성분의 전압을 가하여 xy 평면과 z 방향에 대한 이동을 시킬 수 있으며 탐침을 튜브의 한가운데 고정

시키면 직교성도 비교적 좋은 편이다.

막대형에 대한 이것의 장점을 몇 가지 들어 보면 우선 전체의 크기를 줄일 수 있고 훨씬 튼튼하며 가공이 쉬우며 훨씬 넓은 범위를 주사할 수 있다는 점 등이다. 이들 장점들은 앞에서 설명한 바와 같이 STM에서 매우 중요한 요인들인데 특히 시료의 넓은 범위를 주사하기 위해서는 식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 PZT를 얇게 만들어 주어야 한다. 그러나 막대형에서는 두께를 얇게 할 경우 주사장치 자체가 약해지고 공진주파수도 낮아지는 등의 여러 문제가 생기게 된다. 길이 0.5인치, 외경 0.25인치, 두께 0.02인치인 PZT 튜브를 사용할 경우 원자의 분해능을 가지면서도 수십 μm 의 범위까지 관찰할 수 있다.

주사장치의 교정(calibration)을 위해서는 Michelson간섭계를 이용하는 것이 가장 좋다. 이 때 사용되는 레이저는 파장이 633nm인 He-Ne 레이저가 좋으며 PZT에 걸어준 전압을 변화시키면서 간섭무늬의 이동을 기록하여 교정값을 결정한다. 그러나 보통의 경우 PZT는 이력(hysteresis)현상을 보이며 또 전압에 대한 변형이 엄밀하게 선형적(linear)이지도 않으므로 Michelson간섭계보다 간단하고 쉬운 방법으로 교정하는 것도 좋다.



(a) STM의 주사장치에 사용되는 PZT 튜브
(b) x 축에 전압이 걸릴 때의 변형

그림 3 STM의 주사장치에 사용되는 PZT 튜브와 x 축에 전압에 걸릴 때의 변형

3.3 전자제어회로

STM에서는 시료와 탐침 사이의 거리를 일정하게 유지하기 위하여 터널링 전류를 이용한다. 터널링 전류는 보통 $10\text{pA} \sim 5\text{nA}$ 사이에서 유지되는데 이 값을 역피드백(feed back)회로에서 사용하기 위해서는 $10^7 \sim 10^9$ 배 증폭을 한다. 터널링 전류의 증폭은 전류 증폭기를 사용하거나 그림 4의 윗부분에 나타난 바와 같이 입력이 FET로 된 연산증폭기(OP Amp.)로 간단히 만들어도 된다. 단 이 때 주의하여야 할 것은 형광등 등에서 오는 60Hz의 외부신호를 막기 위하여 탐침과 전류증폭기를 연결하는 전선을 완벽하게 차폐하여야 한다. 일단 터널링 전류가 쉽게 이용가능한 10mV 이상 수준의

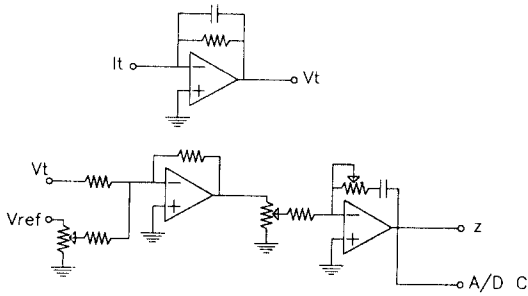


그림 4 STM의 전류 증폭기와 역피드백 회로

전압으로 바뀐 후에는 일반적인 정밀 제어와 다를 게 없다. 제어회로는 미리 설정된 값과 터널링 전류의 차이를 감지하여 이 차이를 줄이는 방향으로 PZT를 움직여 시료와 탐침 사이의 거리를 일정하게 유지한다.

그림 4에 적분기를 채용한 기본적인 제어회로가 나와 있다. 그림 4의 제어회로에서 적분기 대신에 R-C회로의 시간지연을 이용한 제어회로도 많이 사용되며 두 방법 상의 실질적인 성능 차이는 지적되지 않고 있다. xy 평면상에서 탐침을 주사하기 위하여는 단순한 개방형(open loop)방법을 사용한다. 단순히 x와 y에 대응되는 전기신호를 컴퓨터에 연결된 두 개의 D/A(digital to analog) 변환기를 통해 만들어 내고 외부증폭기로 적절한 크기의 전기신호로 만들어 해당 PZT에 가하여 탐침을 이동시킨다. 이 때 전체적인 제어회로에서 전기잡음이 1mV 이하가 되도록 회로를 제작하면 무난하다. 실제로 STM를 사용하는 목적 중에서 많은 부분은 시료의 단순한 표면형상뿐만 아니라 시료의 전기적인 성질을 조사하는데 있으므로 그 회로는 그림 4의 기본회로에 다른 필요한 기능들을 접합시켜 사용한다.

4. STM의 작동

지금까지 설명된 부분으로 STM의 기본골격은 완성되었다. STM을 사용하여 실제로 측정을 하기 위해서는 이외에도 몇 가지 주의할 하

여야 하는데, 시료와 탐침과의 초기접근, 열팽창의 보정, 깨끗하고 날카로운 탐침의 준비 등은 어려운 문제들이다.

4.1 탐침(Tip)의 준비

시료의 표면원자들과 탐침 사이의 작용에 관해서 완전히 이해가 되어있는 것은 아니다. 공기중에서 STM을 사용할 때는 시료의 표면이 유기물 등의 불순물로 오염될 수가 있고 또 탐침의 끝 부분이 산화될 경우도 많으므로 터널링 전류에 큰 영향을 미쳐 측정결과와 신뢰성에 문제가 생길 수 있다. 따라서 신뢰성있는 결과를 위해서는 진공도 10^{-10} Torr* 이하의 초고진공 상태에서 측정을 하는 경우가 많다. 가장 이상적인 탐침은 끝부분에 원자 한 개만이 부착되어 있고 다른 불순물이 없는 상태이다. 탐침의 재료는 텅스텐, 금, 백금-이리듐합금 등이 많이 사용되며 텅스텐의 경우 직경 0.5mm 이하의 선을 30% 정도의 KOH수용액에서 전기화학적 부식으로 끝을 뾰족하게 만들면 무난하다. 가공된 탐침들을 400배 정도의 광학현미경으로 검사하여 끝 부분의 곡률반경을 확인할 수 없을 정도로 뾰족한 것을 골라 사용한다. 공기 중에서는 빨리 산화되어 산화막으로 덮이므로 진공 중에서 사용할 경우는 다시 고속의 전자빔 등을 충돌시켜 산화막을 벗겨내어야 한다. 이와 함께 시료도 깨끗하게 해야하는데 이온빔을 충돌시켜 표면전체를 벗겨낸다든지 진공상태 하에서 시료의 일부분을 벽개(cleave)하는 등 여러 가지 기술이 동원된다.

4.2 초기접근

시료를 고정시키고 탐침을 깨운 후에는 시료와 탐침 사이의 거리가 1nm 이하가 되도록 접근을 시켜야 한다. STM에서는 이 부분이 가장 번거롭고 어려운 것으로 여러 방법이 개발되어 있다. 현재 많이 사용되고 있는 것은

주) *Torr : 1기압은 760Torr.

Burleigh사에서 개발된 Inchworm으로 5nm 정도의 정밀도로 물체를 수십mm까지 움직일 수 있다. 이것은 벌레가 움직이는 것과 같은 원리로 직선운동을 하는데 작은 움직임을 위해 역시 압전소자를 사용한다. 그 외에도 스텝모터와 웜기어를 결합하던가 초기 STM의 개발자들이 Louse라고 이름 붙인 새발가진 벌레를 흉내낸 것, 받침대를 천천히 밀었다가 빨리 빼내어 미끄러지게 하는 방법 등 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 주사장치의 z 방향의 전극에 수백 V의 전압을 가할 경우 이것만으로도 $1\mu\text{m}$ 이상을 움직일 수 있으므로 이들을 결합하여 탐침과 시료를 접근시키며 접근도중 터널링 전류가 검출되면 중지시킨다. 그 후에는 제어회로가 작동하며 미리 정해진 터널링 전류가 유지되도록 시료와 탐침의 거리를 제어한다.

4.3 컴퓨터에 의한 측정자료 수집

일단 시료와 탐침이 접근되어 일정한 거리를 유지하고 있으면 다음단계는 탐침을 xy 방향으로 주사한다. 이때 xy 평면상의 각 좌표에 대해 시료의 표면형상, 즉 z 좌표가 달라지므로 제어회로는 일정한 터널링 전류를 유지하기 위해 탐침을 수직방향으로 움직이고 이 움직임은 주사장치의 z 축에 걸리는 전압의 변화에 의해 제어된다. 따라서 컴퓨터에 연결된 D/A 변환기 2개로 x, y 축 PZT에 걸리는 전압을 조정하여 xy 평면에서의 좌표를 정하고 이 때 z 축 PZT에 걸리는 전압을 A/D(analog to digital)변환기로 읽으면 된다. PZT의 길이변화는 선형적이지는 않지만 좁은 범위에서는 선형적이라고 가정하여도 좋다. 측정의 기본적인 방법은 위와 같지만 또 다른 방법이 있다. 공기 중에서 측정을 할 경우 주위의 온도변화에 의해 STM의 구성부품들의 길이가 변하므로 측정된 시료의 표면형상에 큰 영향을 미친다. 특히 좁은 범위를 관찰할 경우 측정자료의 왜곡이 심하며 이런 경우는 측정 시간을 짧게 하여야 하는데 고속 주사의 경우 제어회로가 충분히 빠르지 못하여 탐침이 시료의 표면굴곡을

따라 가지 못한다. 그대신 터널링 전류에 측정 정보가 실리므로 이 경우는 전류를 측정하여 자료로 삼는다. 앞의 방법은 측정중 터널링 전류가 일정하게 유지되므로 일정전류모드(constant current mode)라 하고 뒤의 경우는 주사중 탐침의 높이가 거의 변하지 않으므로 일정높이모드(constant height mode)라 부른다. 일



그림 5 측정범위 70mm×70mm인 HOPG의 표면-일정전류 모드

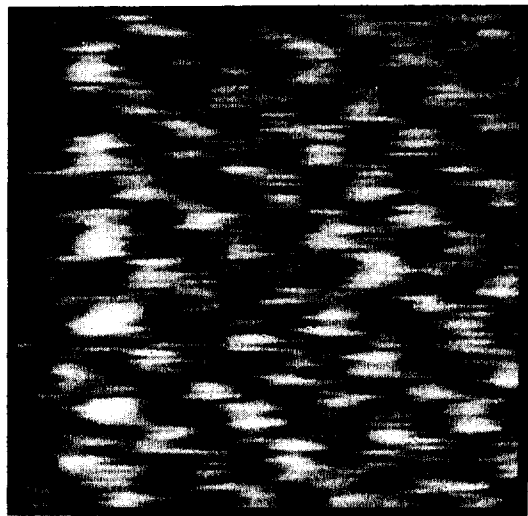


그림 6 측정범위 1.2mm×1.2mm인 HOPG의 표면-일정높이 모드

정높이모드의 경우 측정된 화질의 질이 좋지 못하며 시료표면의 굴곡이 심할 경우 탐침과 충돌할 수도 있으므로 환경이 나쁠 때의 참고 자료 정도로 사용된다. 그림 5와 그림 6에 각각 일정전류모드와 일정높이모드로 Union Carbide사의 HOPG(highly oriented pyrolytic graphite)표면을 측정한 결과가 있다.

4.4 열팽창에 의한 왜곡보정

특별한 환경이 아니면 열팽창에 의한 측정화면의 왜곡은 피할 수 없다. 따라서 공기 중의 측정때는 완벽한 온도조절을 하고 또 완벽한 방음을 해주어야 한다. 공기중에서는 측정이 소리에 도 매우 민감한데 사람의 고막을 진동시키 정도의 소리는 시료의 표면을 크게 진동시키기 때문이다. 이런 문제들을 피하기 위해서는 STM주위를 초고진공(ultra high vacuum)상태로 만들어 주는 것이 좋다. 초고진공은 STM을 위해 아주 좋은 환경인데 우선 열팽창 효과를 줄일 수 있고 시료표면의 산화와 오염을 방지하며 탐침도 깨끗하게 오랫동안 보존할 수 있다. 더욱 좋은 환경은 초고진공상태에서 온도까지 4K 정도로 내려서 얻어진다. 이 때는 He를 제외한 모든 잔류기체가 진공조내의 벽면에 붙어서 더 이상 시료를 오염시키지 않으며 온도자체의 요동(fluctuation)도 아주 작아져서 한 개의 원자를 몇 주일에 걸쳐 관찰할 수 있다.⁽⁴⁾ 실온에서의 초고진공 상태하에서는 열팽창 문제를 완전히 무시할 수는 없으며 이의 보정을 위해서는 측정시간을 달리 했을 때 여러가지 달라지는 화상에서 열팽창의 정도를 계산하여 측정 후 화상을 바로잡아 주거나 일정한 시간간격으로 연속적으로 측정한 화상에서 열팽창을 계산하여(auto-correlation) 측정 중 x,y 축에 걸리는 주사전압을 변경시켜주는 등의 방법이 있다.

5. STM기술의 응용

지금까지 설명해온 STM은 시료표면과 탐침

과의 거리를 측정하기 위해 터널링 전류를 사용하기 때문에 전기가 통하지 않는 부도체에는 적용할 수 없다. 이를 해결하기 위해 Binnig은 STM과 거의 같은 원리로 작동하는 현미경을 제작하였는데 AFM(atomic force microscope)으로 이름 붙여진 이 장비는 STM 못지않게 여러 분야에서 사용된다.⁽⁵⁾ 중성원자가 가까이로 다른 중성원자를 접근시켜 가면 처음에는 인력이 차츰 강해지다가 최대인력점을 지난 후에는 다시 척력으로 바뀌어 간다(van der waals force). 날카롭게 가공된 탐침을 외팔보(cantilever)에 부착시키고 시료표면에서 주사할 때 탐침의 끝 부분은 시료표면의 원자의 최대 인력점에서 위치하려고 한다. 이 때 외팔보의 수직 방향의 움직임을 터널링 전류나 레이저를 이용해 정밀하게 측정하여 탐침을 최대 인력점에 계속 위치시키며 이 때 필요한 제어 신호를 읽어들이어 표면정보를 해석한다. AFM은 원자수준의 분해능을 가지면서 부도체뿐만 아니라 시료에 작용하는 약한 힘까지 측정할 수 있다.⁽⁶⁾ 이외에도 STM의 원리를 응용한 많은 초정밀 측정 기술이 1980년대 후반 이후 개발되었으며 새로운 장치들도 계속 개발되고 있다.

STM을 이용한 측정중 현재 가장 활발한 분야는 반도체연구로 산화막의 형성과정, 반도체와 반도체 및 반도체와 금속의 접합부위의 전기적 성질 등 고성능 소자의 생산기술과 연관시켜 원자수준에서 연구를 해가고 있다. 또 해당 원자가 위치한 부분의 전기적 성질을 조사하여 Si의 본드가 H와 결합을 하였는가 아닌가를 조사한다든지 하는 것들도 매우 중요한 일이다.

특수목적에 사용되는 거울면이나 가공된 초정밀 부품의 표면 거칠기는 그 부품의 성능을 결정적으로 좌우하는데 이것을 정확히 또 비파괴적으로 측정하기 위해서는 STM의 측정원리를 응용하는 것이 가장 유망하다.

최근에는 STM으로 시료표면의 특정 원자를 뽑아서 다른 곳에 이동시키거나⁽⁷⁾ 탐침과 시료

표면 사이에서 원자 한 개를 재현성 있게 주고 받는 기술, 수nm 크기의 글자를 새기는 기술 등이 발표되고 있다.

이들보다 더 실용적인 방향으로 눈을 돌려 선폭 1nm~1 μ m 수준의 형태를 가공하는 기술 등도 이미 실현되고 있으며 이를 이용하면 그동안 이론적인 연구에 그쳤던 새로운 개념의 소자들의 연구나 양자역학이론의 검증실험 등도 실현될 수 있을 것이다.

6. 맺음말

최근 몇 십년 동안 다른 분야의 과학, 기술의 발전과 함께 초정밀 측정의 여러 분야에서도 평균 10년에 10배 정도의 측정능력의 향상을 보여왔다.⁽⁸⁾ 이에 따라 이들 분야는 그 동안 비약적으로 발전한 과학 기술의 토대가 된 것 이외에도 그 전에는 단순한 이론적인 논의에 머물러 있던 여러가지 가능성들을 현실화시켰다.

1980년대부터 새롭게 우리에게 다가온 nm의 세계는 그 동안 마이크로의 기술이 인류에게 가져다 준 성과 이상의 것을 약속하고 있다.⁽⁹⁾ Nanoscience와 Nanotechnology라는 용어가 차츰 일상적인 것이 되어가고 있으며 이들 기술을 응용한 제품들이 선을 보이고 있다.

STM은, 개발된지 10년이 되는 현 시점에서 다른 분야들에 기술적으로 많은 파급효과를 끼쳤으며 STM자체의 성능도 크게 향상되었다. 앞으로도 성능 향상은 빠른 속도로 진행될 것이며 특히 단순한 측정장치를 넘어 가공과 제조장치로서 크게 기대가 된다. 다양한 형태로 결합된 개별 원자들의 성질을 측정함으로써 거시적으로 나타나는 여러 복합적인 현상들을 근본적으로 이해할 수 있고 또 nm 수준에서의 공정제어로 품질 좋은 무결점의 제품 생산을

가능하게 해 줄 것이다.

참고문헌

- (1) Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch. and Weibel, E., 1983, "7 \times 7 Reconstruction on Si (111) Resolved in Real Space," Phys. Rev. Lett. Vol. 50, pp. 120~123.
- (2) Young, R., Ward, J. and Scire, F., 1972, "The Topografiner: An Instrument for Measuring Surface Microtopography," Rev. Sci. Instr., Vol. 43, pp. 999~1011.
- (3) Binnig, G. and Rohrer, H., 1987, "Scanning Tunneling Microscope-from Birth to Adolescence," Rev. Mod. Phys., Vol. 59, pp. 615~625: 1986년 노벨상 수상강연
- (4) Eigler, D.M., Lutz, C.P. and Rudge, W.E., 1991, "An Atomic Switch Realized with the Scanning Tunneling Microscope," Nature, Vol. 352, pp. 600~603.
- (5) Binnig, G., Quate, C.F. and Gerber, Ch., 1986, "Atomic Force Microscope," Phys. Rev. Lett., Vol. 56, pp. 930~933.
- (6) Ruger, D. and Hansma, P., 1990, "Atomic Force Microscopy," Physics Today Oct. pp. 23~30.
- (7) Lyo, I.W. and Avouris, P., 1991, "Field-Induced Nanometer-to Atomic-Scale Manipulation of Silicon Surfaces with the STM," Science, Vol. 253, pp. 173~176.
- (8) Cohen, E.R. and Taylor, B.N., 1989, "The Fundamental Physical Constants," Physics Today Aug. Bg8.
- (9) Quate, C.F., 1991, "Switch to Atom Control," Nature, Vol. 352, p. 571. 