

초고진공용 주사형 터널링 현미경의 제작

구자용, 김달현, 박해원, 김구영, 이세경
한국표준과학연구원

요약 진공도가 10^{-11} Torr 수준의 초고진공 상태에서 작동되고 실제공간에서 개별원자를 구별할 수 있는 주사형 터널링 현미경을 제작하였다. 주사형 터널링 현미경의 배경 및 작동원리와 제작에 있어서의 제문제점들을 서술하고 후연결결과 실리콘에 대해서 관찰한 결과를 보고한다.

1. 서론

고체상태의 물질을 연구하는데 있어서 미시적 수준에서의 물질의 조성, 균질성, 결합상태 등의 정보를 규명하는 것은 근본적으로 가장 필요한 일이다. 이러한 정보를 통하여 대상물체의 열적, 전기적, 기계적 성질등을 짐작할 수 있고 또한 아직 알려지지 않은 새로운 과학적인 사실들을 밝혀낼 수 있다. 미시적 세계의 연구를 위해서 현재까지 많은 방법들이 개발되어 있으나 그중에서 가장 직접적으로 도움이 되는 것은 실제공간에서의 구성물질의 배열을 보여주는 현미경이다. 이러한 목적을 위해서 개발된 현미경의 종류로는 광학현미경, 전자현미경(SEM, TEM 등)등이 잘 알려져 있고 현재까지의 과학의 발전에 많은 공헌을 해왔다.

1980년대 초에 개발된 주사형 터널링 현미경(Scanning Tunneling Microscope, 이하 STM으로 약칭)은 이들 현미경 중에서도 가장 해상도가 높다. 현재까지 구현된 STM의 성능은 수직 해상도가 0.1Å, 수평 해상도가 2Å의 수준에 이르므로 도체인 대상체를 원자수준까지 직접 관찰하는 것이 가능하며 또 시험체와는 직접 접촉하지 않은 상태에서 작동하는 비파괴 검사 장비라는 특성도 가지고 있다. 또한 시료와 탐

침과의 사이에 흐르는 터널링 전류를 이용하므로 다양한 전기적 특성을 조사하는 것이 가능하며 경우에 따라서는 시료표면의 원자들을 이동시키는 등의 조작성으로 인하여 개별 원자들의 결합에 관련된 정보를 얻거나 극미세 전자소자의 연구에의 활용 등도 기대된다.

당초 표면과학의 연구를 위해 개발된 STM은 그 강력한 기능으로 인해 개발된지 10여년이 지난 현재는 물리, 화학, 생물, 기계, 재료 등의 여러분야에 활용되고 있으며 여러 문제들에 대해 원자수준에서의 근본적인 해답을 제시하고 있다.

2. 배 경

2.1. 발전 과정

현재의 STM과 가장 비슷한 모양과 기능을 가진 장비로는 1972년 미국의 NBS(National Bureau of Standards)에서 R. Young 등에 의해 개발된 Topografiner를 들 수 있다.¹⁾ 이것은 그 당시까지의 여러 현미경들과 비교할 때 매우 높은 배율을 달성하였다. 이것은 고배율에 필요한 아주 작은 범위의 주사를 위하여 압전소자인 PZT를 사용하였고 전도성을 가지는 시료의 표면형상을 측정하기 위하여 금속 탐침을 사

용하였다. 탐침과 시료 사이에는 일정한 전류가 흐르고 그 사이에 걸리는 전압을 일정하게 유지하기 위하여 역피드백(feedback) 회로가 사용되어 결국 탐침은 항상 시료 표면과 일정한 거리를 유지하게 된다. 이와 같은 상태에서 탐침을 수평방향으로 주사(scan)시키면 탐침의 움직임은 시료의 입체적인 표면형상을 따라간다. 이때 탐침과 시료는 수백Å 정도 떨어져 있으며 그 사이에는 전기장방출(field emission)에 의한 전류가 흐른다. 이 방법으로 수직해상도 30Å, 수평해상도 4000Å 정도의 성능을 달성했다. 또 R. Young 등은 탐침을 시료에 가까이 할수록 해상도는 더 좋아지며 결국 그 거리가 수 Å 안에 접근하면 터널링 현상으로 매우 높은 성능을 달성할 수 있다는 것을 보였지만 터널링 전류에 의해 작동하는 장치를 완성시키는 데까지는 이르지 못했다.

현재의 STM은 앞의 장치와는 전혀 다른 배경에서 시작되었다. IBM의 Zürich 연구소에 있던 H. Rohrer와 G. Binnig은 금속 표면에 얇게 만들어진 산화막에 대한 특성조사를 위해 적절한 연구방법을 찾고 있었다.²⁾ 마침 그 전까지 양자역학적인 개념에 바탕을 둔 터널링현상의 연구에 관한 논문들이 몇개 발표되었고^{3,4)} 여기에 관심을 기울인 H. Rohrer와 G. Binnig은 이들 방법을 발전시키고 또 시료위에서 탐침을 주사시키면 당초의 목표를 달성시킬 뿐만 아니라 매우 강력한 새로운 현미경을 개발할 수 있음을 알게 되었다.

그들은 처음부터 터널링이라는 개념에서 출발했기 때문에 이를 실현시키기 위해 모든 노력을 집중하였고 하나 하나 문제를 해결해 가면서 비교적 빠른 시간안에 기본장치를 완성하였다. 그동안 진공을 매개로 한 터널링 현상의 입증, 박막에 대한 조사에서 단일 원자층의 관측, 그리고 최후로 실제공간에서의 개별원자의 관측을 성공적으로 수행했다. 그 사이에도 간간히 발표된 논문들로 인해 조금씩 세상에 알려지기 시작하던 STM은 표면과학에서의 오랜 숙제이던 Si(111)-7×7 구조를 명확히 밝힘으로써 그 강력함을 입증하면서 여러 인접분야의 전문가들에게 큰 충격을 주었다.⁵⁾ 그후 3년 정도는 Zürich 그룹 이외에서는 이 장치를 구현하지 못하였으나 1985년경부터는 다른 선두그룹들도 STM을 이용한 연구논문들을 발표하기 시작하여 1980년대 후반까지는 주로 표면과학 분야의 오래된 문제들을 단기간에 명확하게 해

결하였다. 또한 그동안 STM의 정교한 제어장치를 이용하여 STM과 거의 비슷한 원리로 작동하는 많은 새로운 현미경들이 세계 곳곳에서 개발되었는데 그 중 대표적인 것이 atomic force microscope이다.⁶⁾

STM의 강력한 성능이 표면과학분야에서 발휘되고 있는 동안 물리학과 화학의 다른 분야와 생물학이나 기계공학, 재료학등에서도 STM을 도입하려고 노력하여 1990년대에 들어오면서 STM 및 STM의 동류(同類)들이 자연과학과 공학의 여러분야에서 매우 큰 역할을 담당하고 있다.

2.2. 작동원리

STM이 그전의 다른 장치들과 특별히 다른 점은 터널링 현상을 이용한다는 점이다. 터널링 현상은 전자의 운동을 파동으로 취급하는 양자역학(quantum mechanics)에서 자연스럽게 나오는 개념으로 물리학에서는 일찍부터 잘 알려져 있었고 특히 두개의 도체 사이에 얇은 절연체를 끼운 터널링 접합은 매우 많은 연구가 되어왔다.

그러나 이 절연체가 고체인 경우에는 고체고유의 성질이 개입하므로 진공을 절연체로 하는 진공터널링(vacuum tunneling)이 큰 관심사였다. 그러나 진공을 사이에 둔 두개의 도체를 오랜 시간 동안 수Å의 일정한 거리로 유지시킬 수 있는 제어기술이 1970년대까지는 개발되지 않았다. 1972년 R. Young등이 Topografiner를 개발하면서 시료와 탐침 사이의 거리를 일정하게 유지하는데 전기장방출에 의한 전자를 이용하였고 거기서 더 나아가 터널링 전류를 사용할 경우에 생기는 이점을 보여주는 부분적인 결과까지 얻었으나 결국 STM의 제작에 이르지 못한 것은 이러한 기술의 한계에 의한 탓도 있었다.

시료에 탐침이 매우 가깝게 접근했을 때의 3차원적인 계산은 매우 어렵다. 다만 이것을 몇차례의 근사를 거쳐 계산을 단순화시키면 터널링 전류는 아래의 식과 같이 시료와 탐침사이의 거리에 지수함수적으로 민감하게 영향을 받는다.⁶⁾⁻⁹⁾

$$I \propto \exp(-2kd)$$

I : 터널링 전류

d : 시료와 탐침사이의 거리

k : 시료와 탐침의 일함수에 관련된 상수

STM의 강력한 성능은 위의 식이 나타내는 특성에서 나온다. 즉, 많은 금속의 경우 일함수는 4eV 수준인데 이때 $k=1.0/\text{\AA}$ 수준이 되며 이때 시료와 탐침과의 거리가 원래의 상태에서 1\AA 만큼 멀어지면 터널링 전류는 원래보다 10분의 1로 줄어든다. 이러한 특성때문에 터널링 전류를 정밀하게 감시하면 0.1\AA 이하의 거리 변화도 쉽게 알 수 있으며 이 때문에 0.1\AA 수준의 수직방향의 해상도가 가능하게 된다.

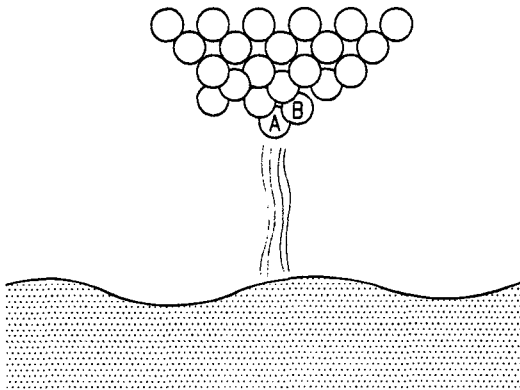


Fig. 1. A typical atomic configuration of the tip. The tunneling current flows between the sample surface and the individual atoms on the tip.

한편 Fig. 1에서 나타내는 바와 같이 원자수준에서는 탐침의 끝부분은 둥글지 않다. 탐침의 끝부분에 돌출된 원자가 한개뿐일 경우 시료에서 두번째로 가까운 원자 B는 시료에서 가장 가까운 탐침 끝부분의 원자 A보다 최소한 1\AA 이상 시료에서 멀리 떨어져 있다. 따라서 위에서 대략적으로 예측한 터널링 전류값을 대입하면 탐침의 끝 부분의 단 한개의 원자 A를 통하는 터널링 전류는 전체의 90% 이상이므로 탐침은 실제적으로 단 한개의 원자로 이루어진 것이나 큰 차이가 없다. STM에서 끝 부분의 곡률반경이 수백 \AA 이상 되는 탐침으로 $2-3\text{\AA}$ 의 수평해상도를 달성하여 개별 원자들의 배열을 관찰할 수 있는 것도 이러한 이유에서이다. 결국 터널링 전류의 거리에 따른 지수함수적인 의존성에 의해 STM의 수평 및 수직방향의 해상도는 \AA 수준을 달성하게 된다.

3. 기계적 구조

3.1. 3차원 주사기(Scanner)

STM을 이용하여 원자수준의 미세구조를 관찰하는데 가장 중요한 역할을 하는 것은 3차원 주사기이다. 여기에 탐침(tip)을 고정시켜 시료의 표면을 주사하면서 시료의 표면과 탐침이 일정한 거리를 유지하도록 하면 탐침은 시료의 표면형상을 그대로 따라가게 되며 이때 탐침의 움직임은 주사기에 걸리는 전압에 의해 제어된다. 따라서 주사기는 전압에 의해 정밀하게 구동되어야 하고 이력(hysteresis)현상이 나타나지 않아야 하며 견고해야 하는 등의 여러가지 까다로운 특성을 가져야 한다. 처음 G. Binnig과 H. Rohrer가 STM을 제작했을 때는 가늘고 긴 PZT막대기 3개를 서로 직교하도록 접합하여 그 교차점 부근에 탐침을 고정시켜 3차원 운동을 하도록 하였다.¹¹⁾ 이러한 주사기의 구조는 초기의 STM에 사용되었고 현재도 부분적으로 사용되고 있다. 그후 G. Binnig등에 의해 단일 PZT원통으로 만들어진 주사기가 소개되었고 이것의 장점이 알려지면서 현재는 거의 대부분의 STM에서 원통형의 주사기가 사용되고 있다.¹²⁾

압전소자의 전압에 대한 변위는 소자의 두께에 반비례하므로 큰 변위를 만들기 위해서는 두께가 얇아야 한다. 삼발이(tripod)형의 주사기에서는 막대의 두께를 얇게 할 경우 여러가지 문제점이 생긴다. 그 첫 번째는 두께가 지나치게 얇을 경우 각각의 다리가 휘어질 수 있다는 점이다. 이로 인해서 의도한 바대로의 정확한 변위를 줄 수 없으며 또 구조적인 취약점으로 인해 외부의 약한 충격에도 쉽게 부서질 수 있다. 두 번째는 주사기 자체의 공진주파수가 낮아져서 빠른 속도의 주사를 할 수 없는 점이다. 이것은 주사기 자체의 견고성이 떨어진다는 것과 같은 의미를 가지는 것이며 또한 이로 인해 STM의 해상도가 떨어지게 된다. 세 번째는 주사기의 감도가 작으므로 그 크기가 커져야 한다는 점이다. 이것은 STM 전체의 크기를 크게 하는 역할을 하며 이 경우 외부진동의 영향에 매우 취약하여 제작이나 사용상 많은 불편이 따르게 된다.

삼발이형의 주사기에서 각축의 주사를 담당하는 PZT 막대의 형태가 길이 20mm , 두께 2mm 인 경우 그 감도는 $20\text{\AA}/\text{V}$ 정도이며 이때 막대의 폭과는 무관

하다. 따라서 감도를 $100\text{\AA}/V$ 정도로 하고싶은 경우에는 두께를 줄이고 길이를 길게 해야하지만 두께가 1mm 이하의 수준으로 얇아지면 위에서 언급한 것과 같은 문제점들이 생기며 이를 피하려면 주사기 자체가 지나치게 커진다.

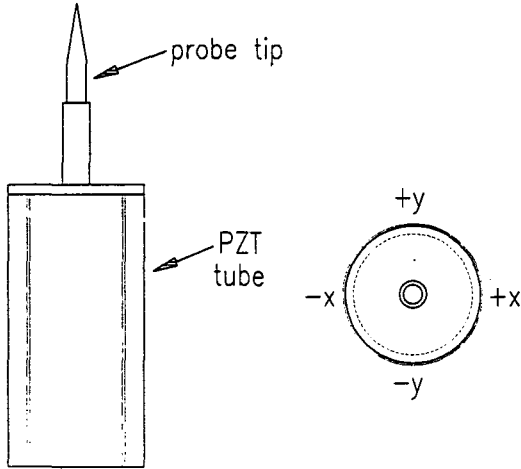


Fig. 2. The scanner fabricated from a PZT tube.
The electrode coated outside the tube is divided into 4 pieces and the inner electrode is coated inside the tube.

현재는 많은 STM에서 원통형의 주사기를 사용하고 있다. 한 예를 들면 두께 0.5mm , 길이 6mm 인 PZT 원통으로 주사기를 만들 경우 z -축 방향의 감도는 $40\text{\AA}/V$ 정도가 된다. 이것은 앞의 삼발이 형과 비교해 볼 때 그 크기에서 매우 유리하며 이 경우 두께는 얇지만 그 구조가 원통형이기 때문에 기계적으로 더 견고하다. PZT 원통의 바깥 전극을 세로 방향으로 4등분하여 Fig. 2와 같이 만들고 탐침은 원통의 한가운데 고정한다. 이때 z -축 방향의 운동은 원통의 내부전극의 전압에 대해 4개의 바깥전극에 동시에 같은 전압성분을 가하면 된다. 또 x -나 y -방향의 운동은 앞의 삼발이형과는 다르게 되는데 서로 마주보는 두개의 전극에 서로 반대되는 부호의 전압을 걸어주면 한쪽은 팽창하고 한쪽은 수축하여 주사기의 끝부분이 비틀리며 결과적으로 탐침을 xy -면에서 주사하는 역할을 하게 된다. 이때 두개의 전극에 걸여주는 전압은 반대부호가 되도록 하지 않아도

xy -면에서의 주사는 가능하지만 넓은 범위에서의 주사때 상하좌우의 균형이나 열팽창효과 등을 고려하면 이 방법이 유리하며 주사기의 교정에서도 단순해진다. 이때 xy -면에서의 감도는 위에서와 같이 작은 원통형에서도 $100\text{\AA}/V$ 이상을 쉽게 달성할 수 있다.

한편 주사기는 기본적으로 3차원 운동을 동시에 해야 하므로 z -축과 xy -면에서의 운동을 동시에 제어하기 위해 필요한 각각의 전압을 PZT의 전극에 가해 주어야 하는데 이때 방법상으로는 몇 가지가 있다.

가장 간단한 방법으로는 Fig. 2와 같은 구조에서 PZT원통의 안쪽전극에 z -축 전압을 가하고 바깥의 4개 전극에 $-x, -y, +x, +y$ 의 전압을 가하여 3차원 운동을 제어하는 방법이 있다. 이때는 각 축의 전압은 완전히 독립적이며 전자제어 부분도 가장 간단해진다.

두번째는 안쪽 전극을 접지시키고 바깥쪽 전극에 xy -전압을 가하는데 이때 z -축 전압을 4개의 전극에 공통적으로 더해주는 방법이다. 이때는 OP Amp를 통해 전압을 더해줘야 하므로 좀더 복잡해지지만 터널링 전류가 흐르는 선을 원통 안쪽으로 뽑아내면 외부영향에 대한 차폐(electromagnetic shielding)를 좀더 효율적으로 할 수 있는 이점도 있다.

세번째는 z -축을 위한 전극을 바깥쪽에 별도로 만들어 주는 방법이다. 이때는 주사기의 가공이 좀더 복잡해 지지만 내부전극을 접지시키거나 $-z$ 전압을 가하는데 사용할 수 있으며 열팽창의 보상에 이용할 수도 있고 또한 z -전극의 길이를 변화시켜 각 축의 감도를 조절할 수 있는 이점도 있다.

원통형의 경우 xy -면에서의 주사는 원통의 비틀림을 이용하므로 탐침 끝 부분의 전압에 대한 감도는 탐침의 길이에 따라 변하며 실제 교정은 수시로 해야 한다.

PZT를 비롯한 주사장치에 이용되는 모든 자연계의 물질은 다소간 이력(hysteresis)효과와 비선형(nonlinear) 효과를 가진다. 따라서 $-x$ 방향으로의 주사와 $+x$ 방향으로의 주사때 이력 효과에 의해 같은 전압에 대해서 위치가 일치하지는 않으므로 한쪽방향으로의 주사만을 이용해야 한다. 이렇게 할 경우는 PZT를 사용하여 10\AA 이하의 주사범위에서도 특별

한 이력현상은 보이지 않는다. 비선형 효과는 넓은 범위를 주사할 때 특히 두드러지는데 이것 또한 피할 수 없으므로 근본적으로 해결하기 보다는 측정후 보상에 주는 편이 쉽다.

3.2. 시료지지대

시료와 탐침의 상대적인 위치는 크게 수직적 관계와 수평적 관계의 2가지로 생각할 수 있다. 각각의 경우 물론 장단점이 있지만 여기서 제작된 STM의 경우 수평으로 하였다. 두꺼운 밀판(baseplate) 위에 주사기와 시료가 서로 수평의 위치를 유지하며 놓여 있고 시료는 시료지지대 위에 놓여있다. 진공조안에서 여러개의 시료를 교환해 가면서 관찰하기 위해서는 시료를 그에 맞도록 고정시켜야 한다. 각각의 시료는 우선 별도의 시료고정장치에 단단히 고정되고 시료의 교환이나 이동은 wobble stick을 이용하여 시료고정장치 전체가 이동되어 STM의 본체에 있는 시료지지대에 별도의 고정이 없이 올려진다. 이렇게 하는 이유는 시료관찰을 위해서는 더이상의 시료고정이 필요 없기 때문이기도 하고 또 시료의 잦은 이동이나 탐침과의 상대적인 위치조정을 쉽게 하기 위해서이다. Fig. 3에 시료고정장치와 시료지지대가 표시되어 있다. 시료지지대는 시료고정장치보다는 좀 더 크고 넓게 되어서 테두리가 만들어져 있다. 시료지지대를 시료고정장치보다 크게하는 것은 진공중에서 시료 이동을 쉽게 하기 위한 것이고 테두리는 시료의 벽개(cleavage)된 단면을 관찰할 필요가 있을 경우 시료를 벽개하는데 시료고정장치를 잡아주는 것으로서 꼭 필요하다. 시료지지대는 밀판과는 절연이 되어 있으며 또 지지대의 양쪽 테두리도 역시 절연이 되어 있어서 반도체 등과 같이 비저항이 큰 시료인 경우 시료를 통하여 직접 전류를 흘리는 방식으로 시료를 700°C 정도까지는 쉽게 가열할 수 있다. STM의 응용실험에서 시료를 그대로 둔채 가열할 수 있는 기능은 연구의 범위를 폭넓게 해주며 매우 편리하다. 실리콘과 같이 재배열을 위해 1000°C 이상이 요구되는 경우는 밀판위에서의 직접가열은 지나친 전류와 열의 발생으로 다른 부분에 여러가지 나쁜 영향을 미치므로 별도의 가열장치를 마련하여 가열한 후 냉각된 시료를 다시 이동시켜 관찰하는 것이 좋다. 시료고정장치가 알루미늄으로 되어 있을 경우 가열하면 내부

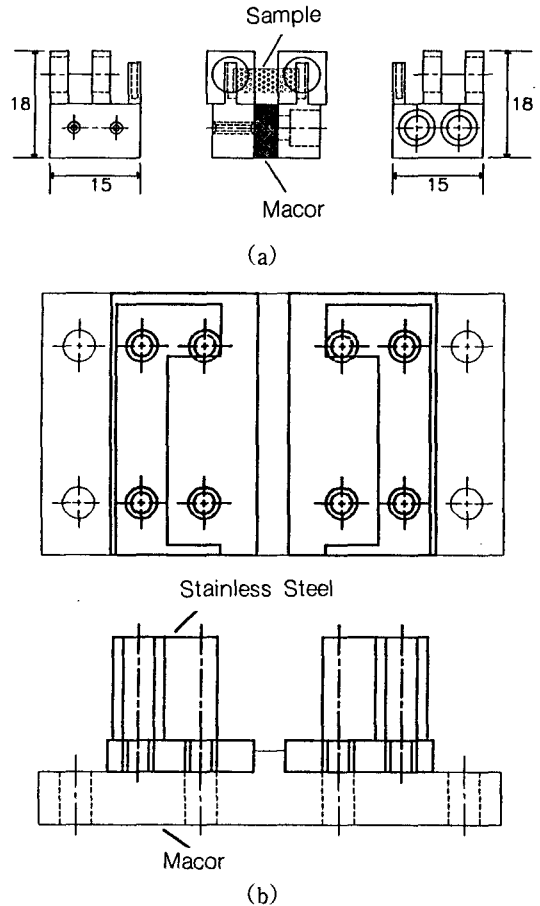


Fig. 3. (a) The sample-holder fixing the sample.
(b) The holder-supporter which supports the sample-holder.

에서 많은 기체가 빠져나와 진공도를 나쁘게 하므로 알루미늄의 사용은 피해야 한다.

시료지지대와는 별개의 것이지만 진공조의 옆면에서 별도의 선형 이동장치를 직각방향으로 넣어주면 몇가지 유익한 목적에 사용할 수 있다.

그 첫번째는 시료에 대한 탐침의 미세이동이다. 이것은 옆에서 넣어준 막대의 일부를 갈고리 형태로 만들어 주사기 받침대를 밀거나 당겨서 이루어진다. 보통의 경우 시료를 깨끗하게 준비하는 것은 매우 중요한 일이지만 시료의 전표면을 관찰에 적합하게 만드는 것은 어렵다. 따라서 탐침의 미세 이동 기능은 같은 시료에 대해 조금씩 옆으로 이동하면서 시료를 관

찰할 수 있게 해줌으로써 시료의 좋은 부분을 관찰할 수 있는 기회를 더 많이 제공해 주며 진공중에서와 같이 많은 시료의 교환이 어려운 경우 특히 유익하다.

두번째는 시료의 벽개된 단면을 관찰할 때 시료를 벽개하는 기능이다. 특별한 단결정 시료의 경우 특정한 방향에 대해서는 결합력이 약하기 때문에 쉽게 벽개되어서 깨끗한 원자배열을 노출시킨다. 10^{-11} Torr 수준의 초고진공중에서 벽개를 하면 매우 깨끗한 표면상태를 얻고 오랜 시간 동안 유지시킬 수 있으므로 이 방법은 자주 이용된다.¹³⁾ 시료고정장치에 얇고 길게 만든 시료를 벽개하기 쉽도록 길이 방향으로 세우고 직각방향에서 넣어준 막대기의 홈에 시료를 끼워서 부러뜨리면 비교적 쉽게 벽개된 표면을 얻을 수 있으며 실리콘의 경우(111)-방향으로 준안정성을 가진 2×1 구조를 관찰할 수 있고 화합물 반도체인 GaAs의 경우도 (110)-방향의 깨끗한 표면을 얻을 수 있다.

세번째는 탐침의 열처리 기능이다. 탐침은 거의 공기중에서 가공하게 되므로 끝부분에 산화막이 있는 경우가 많고 경우에 따라서는 유기물이 묻어 있는 경우도 흔하다. 산화막이나 유기물이 시료와 탐침 사이에 있을 경우는 신뢰성 있는 실험결과가 나오지 않거나 관찰 결과의 해석에 어려움이 많게 되므로 이들을 제거해야 한다. 제거방법은 가열된 필라멘트를 탐침의 바로 앞에 두고 강한 전기장을 걸어서 열전자를 방출시켜 탐침의 끝부분을 때리게 하는 것이다. 이 방법으로 얇은 산화막이나 유기물의 막은 쉽게 없어지며 특히 spectroscopy의 실험 때 재현성 있는 결과를 얻을 수 있다.

3.3. 진동차단장치

시료의 표면에 존재하는 원자배열들을 관찰할 수 있는 수준의 해상도를 얻기 위해서는 완벽한 수준으로 외부 진동을 차단해야 한다. 시료와 탐침이 일정한 거리를 유지하면서 정지하고 있을 때 외부진동이 이들 사이의 위치관계에 미치는 영향이 0.1\AA 이하가 되어야 한다. 그러기 위해서는 우선 실험장소가 기계적으로 안정해야 하는데 바닥이 비지 않은 1층건물이나 지하실에 실험장치를 설치하는 것이 좋다. 바닥이 비어있는 2층 이상의 건물에서는 사람이 지나

나 등의 영향으로 바닥 자체가 흔들리게 되는데 아무리 좋은 진동차단장치라도 1Hz전후의 매우 낮은 주파수의 진동은 효율적으로 차단할 수 없다. 실험실 바닥의 울렁거림이 없을 때는 비교적 간단한 방법으로 외부진동을 차단할 수 있다. 초기에는 STM 자체에 2단계의 용수철로 밀판을 매달기도 하였으나 최근에는 1단계만의 용수철로 밀판을 매달아 효과적으로 진동을 차단한다. 그러나 용수철만으로 하는 것보다 약간의 감쇄효과도 조합하는 편이 진동 차단에는 효과적이다.^{14,15)} 그것은 감쇄가 없을 경우 불가피하게 한번 생긴 진동이 오래 지속되기 때문이며 또한 STM의 내부에서 생기는 진동은 감쇄작용을 통하여 외부의 고정지지대로 배출될 수 있기 때문이다. 진공중에서는 효과적인 감쇄방법은 매우 제한되어 있다. 그중 좋은 방법은 와전류(eddy current)를 이용하는 방법이다. 이를 위해 STM의 밀판 주위로 영구자석을 배치하고 2-3mm 떨어진 곳에 전기 전도도가 큰 구리나 알루미늄 등의 금속판을 영구자석과 평행하게 외부지지대에 고정시킨다. 만약 밀판의 진동이 생기면 자석과 금속판의 상대적인 운동으로 인하여 진동을 억제하는 방향으로 금속판에 와전류가 생기므로 밀판의 운동에너지가 소모되어 밀판의 진동이 줄어든다. 이 방법은 매우 효과적인 감쇄방법으로 특히 진공중에서 STM을 사용할 경우 다른 좋은 방법이 없으므로 모두 이 방법을 사용한다. 외부진동과 함께 STM 자체에서 생기는 내부진동이 또한 문제가 된다. STM에서는 탐침을 시료의 표면에 따라 xy-방향으로 규칙적으로 주사하므로 주사기(scanner)에서 내부진동을 계속 만들어낸다. 만약 STM의 각 부분의 기계적인 공진 주파수가 낮을 경우 주사장치에서 발생하는 진동의 영향으로 공진모드가 크게 여기되어 측정신호에 지장을 준다. 따라서 이러한 영향을 줄이고 자료수집시간을 단축하기 위해서는 STM자체의 공진 주파수를 가능한 높여 주는 것이 좋으며 이런 목적을 위하여 밀판이나 그 위에 고정되는 주사장치 및 시료고정장치 등은 모두 작고 튼튼하게 만들어져야 한다.

3.4. 밀판(Baseplate)

시료와 주사기는 밀판 위에 수평으로 놓여지며 밀판은 다시 외부의 진동차단을 위해 용수철에 의해 매

달려진다. 주사기가 지지되는 지점과 시료가 지지되는 지점은 가능한 가까운 편이 좋으며 그럴 경우 STM의 기계적 공진 주파수를 높이는 데 기여를 한다.

외부의 진동이 있을 경우 용수철과 감쇄장치가 이를 차단해 주지만 극히 일부의 진동은 이를 뚫고 넘어와서 밀판을 진동 시킨다. 이 진동에 대해서 밀판은 둔감하게 만들어져야 하는데 그 방법에는 여러 가지가 있다. 그중 한가지가 밀판을 단순한 평판이 아니라 입체적인 구조물의 형태로 만드는 것이다. 이렇게 함으로써 밀판의 공진모드를 여러개의 부분적 진동모드로 분산시키고 경계조건이 다른 각 지역별로 가두게 되며 그 결과 여러개의 공진주파수들은 단순 평판의 기본공진주파수에 비해 높아지며 진동의 크기들은 작아져서 전체적으로 밀판은 견고해지는 효과를 가져온다. 가령 밀판을 만들 때 두꺼운 스테인레스 덩어리의 속을 파내고 벽은 그대로 두는 가공방법을 택하게 될 경우 몇가지의 이점이 생긴다.

앞의 제3절에서 진동차단에 관해 서술한 것과 같이 감쇄를 위해서는 영구자석을 밀판에 부착시킬 필요가 있다. 이를 위해 별도의 자석 고정장치를 밀판에 고정시키는 것보다 속을 파낸 밀판의 옆면에 바로 자석을 위한 자리를 가공하고 자석을 고정시키는 편이 부품수를 줄이는 면과 밀판의 견고성 증대에 유리하다. 또 적절한 가공치수를 맞추면 밀판 아래에 Inchworm을 그대로 고정시킬 수 있어서 평판형의 밀판보다 부품수는 더욱 줄어든다. 이러한 모양의 밀판의 진동모드는 기본적으로 태두리가 고정된 평판의 진동모드에 가깝기 때문에 태두리가 자유로운 평판의 공진 주파수보다 그 공진 주파수가 매우 높다.¹⁶⁾ 여기에 더하여 영구자석과 Inchworm을 고정시키기 위한 벽이나 돌출부 등은 밀판의 경계조건을 더욱 불규칙하고 작은 영역으로 나누기 때문에 밀판의 진동모드는 더욱 좁은영역의 고주파 모드들로 에너지를 나눠 갖게 된다.¹⁷⁾

또한 부품수가 줄어들어 따라 조립이 쉽고 표면적이 작아져서 초고진공중에서의 실험에 유리하다.

큰 움직임을 위해 채택한 Inchworm은 밀판의 아래에 고정시키면 전체적인 STM의 크기를 아주 작게 할 수 있고 또 그 구조가 매우 간단해진다. 앞서서도 언급한 바와 같이 STM의 크기를 작게 할 경우 진동

의 영향이나 사용상의 편리성 등에서 유리하다. Fig. 4에 STM의 구조를 나타냈으며 밀판위에는 기본적으로 주사기와 시료만 위치해 있다.

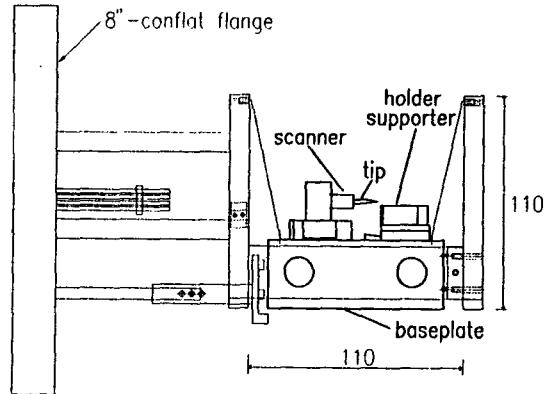


Fig. 4. The side view of STM head. The inchworm is mounted under the baseplate.

3.5. 초기접근장치

STM에서 탐침을 미세하게 움직이는 중요한 역할을 하는 것은 물론 주사기이지만 이것은 기본적으로 압전소자인 PZT로 만들어져 있으므로 mm수준 이상의 큰 움직임에는 부적합하다. 실제 실험상대에서는 탐침을 시료표면과 10Å 보다 가깝게 유지해야 하지만 탐침이나 시료를 교환하기 위해서는 두 물체의 사이가 수 mm 이상 떨어져 있어야 하므로 탐침을 크게 움직이는 별도의 장치가 필요하다. 이를 위해서 초기에 G. Binnig등이 Louse라는 장치를 개발했는데 이것은 새개의 흡판을 가진 벌레와 같은 원리로 움직였으며 지금도 극저온용의 STM등 특수한 목적에 사용된다.¹¹⁾ 최근에는 초고진공용 스텝모터나 Inchworm이 많이 사용된다. Inchworm은 Burleigh사에서 개발한 미세 직선이동장치의 상표명으로 그 사용상의 간편성과 소형화로 인하여 최근에 제작되는 UHV (ultra high vacuum) STM의 거의 대부분에 사용된다. 이것은 벌레의 움직임을 흉내낸 것으로 정밀도 30Å 수준으로 수십 mm까지 이동하며 무엇보다도 크기가 작고 컴퓨터로 제어하기가 쉽다. PZT 주사기의 z-전극에 500V 정도를 가할 경우 이것만으로도 2μm 정도를 움직일 수 있으므로 이 두가지 움직임을 결합하여 탐침을 시료표면에 수십 Å까지

접근시킬 수 있다. 접근시키는 도중 터널링 전류가 검출되면 접근을 중지하고 그 이후는 정해진 터널링 전류가 유지되도록 제어회로가 작동하게 되므로 PZT주사기만으로 모든 움직임을 제어한다.

4. 전자제어부

4.1. 터널링 전류의 검출

실제의 측정상태에서 시료와 탐침사이에 흐르는 터널링 전류는 1nA 수준에서 유지되므로 STM의 제어회로에서 이것을 이용하기 위해서는 10^7-10^9 배 정도로 증폭해야 한다. 증폭 작용은 상용 전류증폭기를 사용하거나 입력이 FET로 된 OP Amp를 이용하여 만든 증폭기로 수행한다. Fig. 5에 그 기본회로가 나타나 있다. 여기에 사용되는 첫번째 OP Amp로는 AD515를 택했고 그 다음단에서 증폭 작용을 하는 것은 OP270으로 하였다. 한편 STM 본체에서 탐침에 연결되어 있는 터널링 전류가 흐르는 전선은 1nA 수준의 매우 작은 전류가 흐르므로 외부의 전기적 영향에 매우 민감하다. 따라서 안정되고 신뢰성 있는 측정을 위해서는 이 전선을 외부 전자파로부터 차폐시켜야한다. 전자파 차폐라는 관점에서 볼 때 전류증폭을 위한 OP Amp는 STM의 본체 안쪽에 두는 것보다 외부에 두는 편이 좋다. 이렇게 할 경우 더 좋은 전자파 차폐를 할 수있고 시스템 자체가 더 간단해지며 그외에도 탐침의 열처리 등을 위해서도 편리해진다.

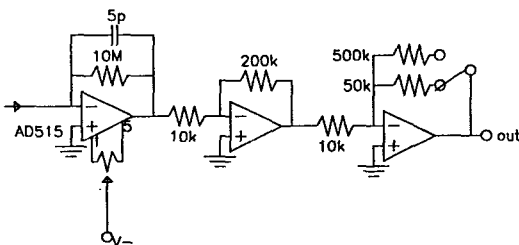


Fig. 5. The current-to-voltage converter.

4.2. 역되먹임 회로(Feedback Circuit)

실제로 사용되는 역되먹임 회로가 Fig. 6에 나타나 있다. 입력단 가까이 있는 회로는 전류의 절대값을

취하는 역할을 하는데 OP Amp 두개와 10kΩ 저항 5개, 그리고 2개의 다이오드로 이루어져 있다. 이것은 특히 bias 전압을 거꾸로 했을 때의 반응을 조사하기 위해서는 필수적인 것으로 매우 유용하다. 이것의 기능은 입력신호를 무조건 양의 부호를 가진 같은 크기의 출력신호로 바꾸어 주는 것으로 수학에서의 절대값을 취하는 기능과 같다. 일반적인 제어회로에서 역되먹임 회로의 입력이 부호가 반대로 되면 제어기능을 잃게 되므로 이를 방지하기 위해서 사용한다. 그러나 이것을 사용하더라도 입력신호가 바뀌는 순간은 출력도 같이 크게 변하므로 이때는 잠시 feedback loop를 끊어 주어야 한다.

그 다음단에는 Log Amp가 사용되는데 이것의 사용목적은 거리에 대한 터널링 전류의 의존성이 지수함수의 형태이므로 이것을 선형의 관계로 바꾸어 주기 위함이다. Log Amp를 사용하지 않더라도 좁은 영역이나 표면거칠기가 심하지 않은 곳에서는 큰 문제가 없다. 그러나 넓은 범위나 표면굴곡이 심할 경우에는 주사속도에 제약을 받게 되고 화상의 왜곡이 생기는 등의 나쁜 결과가 생길 수 있다.

역되먹임 회로에서 가장 중요한 역할을 하는 것은 결국 적분기로서 기준전압과 측정된 터널링 전류신호와의 차이를 적분하여 출력을 시킨다. 이때 최적의 제어를 위해서 적분기에 입력되는 차이신호의 크기를 조정하거나 시상수(time constant)를 조정한다. 이 두가지 조정은 실제로 같은 역할을 하는 것으로 다만 조정영역을 넓히기 위해 두가지로 나뉘었다. 적분기에서 나온 신호는 최종출력단에서 증폭되어 주사기의 PZT전극에 걸린다. 이로 인해서 터널링 전류는 항상 일정한 값을 유지하게 되고 결국 시료의 표면과 탐침의 끝부분은 항상 일정한 거리를 유지하게 된다. 이 회로의 입력 부근에서는 터널링 전류를 읽고 최종부분에서는 feedback 전압을 읽는다. Spectroscopy나 constant height mode 등에서도 같이 터널링 전류의 변화를 기록하는 것은 여러 경우에 유용하며 최종부분의 제어 전압의 변화량은 시료의 입체적인 표면 형상을 그대로 나타내 준다.

4.3. Tunneling Spectroscopy

여기서 spectroscopy라는 용어를 사용하는 것은 터널링현상으로 흐르는 전자들의 에너지가 변할 때 이

에 따라 달라지는 여러 현상을 측정하기 때문이다.

먼저 가장 간단한 경우는 bias 전압이 연속적으로 변하지 않고 같은 크기에서 부호가 바뀔 때이다. 이런 조건에서 반도체의 경우 여러가지 흥미있는 현상들이 나타날 수 있는데 bias 전압을 바꿈에 따라 시료표면의 높낮이의 역전현상이 일어나기도 한다. Bias 전압의 부호를 바꾸는 순간 전압은 0의 값을 가지는 순간이 있으므로 터널링 전류도 순간적으로 0이 되어 탐침이 시료에 부딪힐 수도 있다. 이것을 방지해 주기 위하여 Fig. 7의 회로 마지막 부분에 analog switch인 AD7592를 사용하였다. Bias 전압을 변화시키기 전에 A/DC0으로 제어전압을 읽은 후 같은 값을 D/AC2에 출력시킨다. 그 다음 DI/O1을 0에서 1로 변화시켜 스위치의 출력값이 제어전압에서 D/AC2 값이 되도록 하면 역되먹임회로는 잠시 기능을 상실한다. 그 다음 bias 전압의 부호를 바꾸면 터널링 전류의 부호는 바뀌지만 역되먹임회로에 들어와서는 절대값으로 바뀌므로 그 다음단계에는 영향을 주지 않는다. 최후로 DI/O1을 다시 1에서 0으로 돌려놓으면 bias 전압의 역전은 완성된다. 실험 중의 온도변화에 따른 천이를 피하기 위해서는 수평방향의 주사를 1회한 후 매번 위의 과정을 거치고 다시 bias 전압이 바뀐 상태에서 같은 위치를 주

사하면 동시에 두개의 화상을 얻을 수 있다.

한편 도체나 반도체 재료 혹은 이들의 계면이나 접합부를 STM으로 조사할 경우 전자의 여러 에너지 상태에 따른 밀도를 측정하면 시료의 특성을 평가하는데 많은 도움이 된다. 이를 위해 STM에서는 시료와 탐침이 일정한 거리를 유지하고 있는 상태에서 dI/dV 값을 측정하여 전자의 DOS(density of states)를 추정하는데 사용한다. 이것을 실험적으로 수행하기 위해서는 아래와 같은 방법을 사용한다.

먼저 bias 전압에 주파수 1kHz정도의 작은 크기의 sine함수를 실어서 변조시킨다. 이 변조신호에 의한 터널링 전류의 영향을 보기 위해서는 bias 전압에 대해 위상차가 0이 되는 터널링 전류의 성분을 Lock-in Amp를 이용하여 측정한다. 이때 Fig. 6의 전류증폭기에서 추가되는 위상지연을 정확히 결정하여 고려해 주어야 한다. 위에서 dV 값은 고정되어 있으므로 dI 를 측정하면 된다. 단, dI/dV 만으로는 서로 다른 조건에서의 상태를 비교할 수 없으므로 보통은 규격화시킨 값을 사용한다. 즉 실체는 $(dI/dV)/(I/V)$ 를 측정하는데 I 와 V 값은 변조신호가 없을때의 값으로 한다. 이때에도 역되먹임 고리는 끊어주어야 한다. 그 방법은 앞의 bias 전압의 역전 때와 같으며 컴퓨터를 통해 간단히 제어할 수 있다.

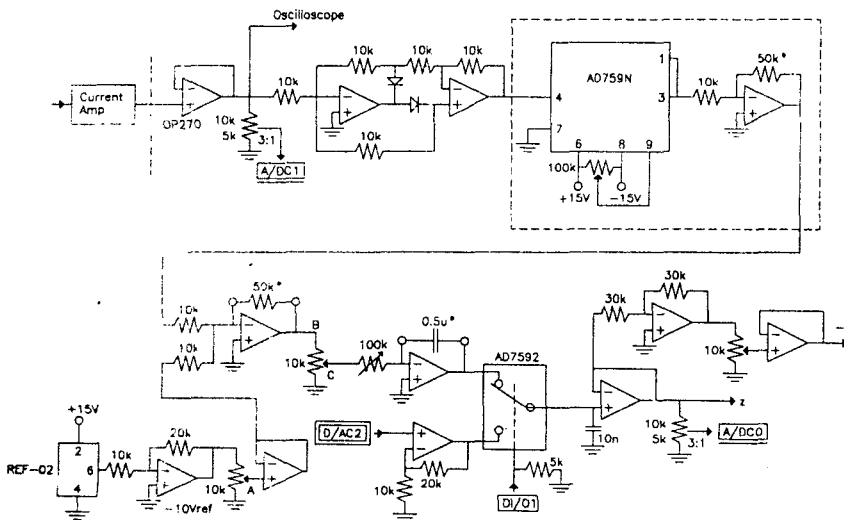


Fig. 6. The feedback circuit for STM.

4.4. Bias 전압의 인가

Bias 전압은 수동과 컴퓨터제어의 두가지 방법을 같이 사용할 수 있도록 하였다. 단순히 시료의 표면형상만을 보기 위해서는 전압을 수동으로 바꾸어 주는 편이 간단하고 편리하다. 그러나 앞의 경우와 같이 spectroscopy 기능을 조사할 때는 bias 전압을 컴퓨터로 제어해야 한다. 이때는 수동으로 연결되는 스위치를 끊어주면된다. Bias 전압을 위한 회로와 xy-주사를 위한 회로가 Fig.7에 나와 있다. 수동식 bias 전압을 위해서는 기준 전압이 필요하다. 이를 위해서 PMI의 Ref02를 사용하여 +5V를 만들었고 OP290을 거쳐서 -5V를 만들었다. 가변저항을 이용해 이 두 전압이 사이값을 결정하고 다음 단계에서 증폭하여 시료에 bias 전압을 걸어주었다. 이 단계에서 컴퓨터의 D/AC 값이 더해질 수도 있고 또 spectroscopy를 위한 1kHz의 변조신호도 동시에 실릴수 있다.

최종단에서의 증폭기는 -150V와 +150V의 범위에서 작동하는 고압 OP Amp를 사용하여 극미세 가공을 위한 강한 pulse를 만들 수 있도록 하였다.

xy-면에서의 탐침의 주사는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 단순히 개방형(open loop)방법을 사용하였다. 즉 컴퓨터에 의해 제어되는 D/AC를 통과한 신호를 단순히 증폭만 하여 PZT주사기의 x-와 y-축으로 넣어 주고 역피드백은 하지 않는다.

이때 사용되는 x-축 및 y-축방향의 전기신호는 $\pm 150V$ 범위의 OP Amp를 통과하여 증폭된다.

5. 컴퓨터에 의한 제어

5.1. 전자제어부의 연결

STM으로 시료의 표면형상이나 전기적 성질을 측정하기 위해서는 모든 제어를 컴퓨터로 하면서 측정 자료를 읽어 들여야 한다. 이를 위해 Data Translation사의 DT2811과 DT2816을 IBM PC 호환기에 꽂아 사용하였다. 제어프로그램은 DOS용 C-언어로 작성하였고 A/DC(analog to digital converter), D/AC(digital to analog converter) 및 DI/O(digital input and output) 등을 제어하였다.

컴퓨터로 제어하는 부분들은 x-, y-축의 주사 및 z-축의 hold, 그리고 bias 전압의 변화등이다. 가장 중요한 측정자료의 수집은 DT2811의 A/D 변환기를 통해서 한다. 여기서는 제어신호의 일부분을 software로 처리하여 hardware를 간단하게 하였으며 전자회로들중 직접 관련이 없는 부분들은 별도로 제작하여 상호 전자기적 간섭의 가능성을 줄이고 신뢰성을 높였으며 제작상 편의성도 높였다. DT2811과 DT2816의 경우 각 기능별로 제어프로그램을 모듈화시킬 수 있으므로 필요할 때마다 각 모듈들을 불러서 사용하면 간단하게 처리할 수 있다.

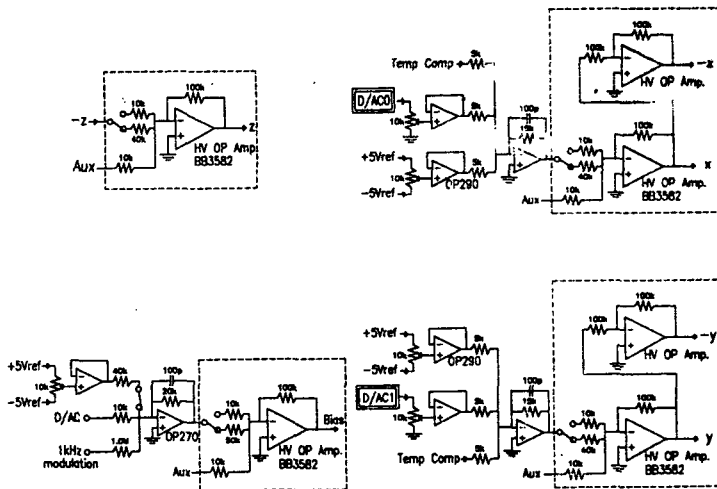


Fig. 7. The circuits for bias voltage and xy-scanning voltage.

5.2. 초기접근 및 자료수집

앞에서도 언급한 바와같이 시료와 탐침의 초기접근은 가장 번거로운 부분인데 여기서는 Inchworm을 사용하여 탐침을 움직여 주는 방식을 사용하였다. Inchworm은 비교적 신뢰성 있게 직선운동을 하고 컴퓨터로 움직임을 제어할 수 있으므로 매우 편리하다. 다만 벌레의 움직임을 모방하였으므로 Inchworm의 내부에서 PZT링으로 운동축을 조여서 잡아주거나 풀어주는 동작을 할 때 $0.1\mu\text{m}$ 수준의 전후 움직임을 있을 수 있다. 별다른 조치 없이 그냥 Inchworm을 움직여 탐침을 접근시키면 시료와 탐침이 부딪칠 수 있으므로 주의가 필요하다. 먼저 $-z$ -축 전극에 -500V 정도의 전압을 걸어서 탐침을 후퇴시킨다. PZT의 감도에 따라 후퇴거리는 $2\mu\text{m}$ 전후가 되는데 그다음 Inchworm을 움직여 탐침을 $1-1.5\mu\text{m}$ 전진시킨다. 그 다음 단계에는 $-z$ -축에 걸여준 전압을 1V씩 높이며 터널링 전류가 흐르는지 검사한다. 500V를 모두 높여도 터널링 전류가 검출되지 않으면 다시 -500V 를 걸어 탐침을 후퇴시키고 Inchworm으로 $1-1.5\mu\text{m}$ 전진시킨다. 그 다음 앞의 과정을 반복한다. 만약 도중에 터널링 전류가 검출되면 즉시 작업을 중단하고 $-z$ -전극의 전압을 -500V 로 높여 탐침을 후퇴시킨 후 다음 단계로 넘어간다. 터널링 전류의 검출 도중에는 역되먹임 회로가 항상 기능을 발휘할 준비가 되어 있으므로 탐침이 시료에 부딪치지 않는다.

위의 과정중에서 터널링 전류가 검출되었을 경우는 그때의 전압을 읽어둔다. 측정도중에는 온도변화에 따른 천이가 있으므로 이것을 항상 보정해 주어야 한다. z -방향의 보정은 $-z$ -전압으로 해주면 편리한데 이를 위해 $-z$ -전압이 -200V 전후에서 동작점이 유지되도록 마지막으로 Inchworm을 움직여 조정해준다.

이렇게 할 경우 매우 빠르고 편리하게 초기 접근을 시킬 수 있으며 시료와 탐침이 부딪히는 일이 거의 없다.

초기접근이 끝난 후에는 바로 STM의 본 작업에 들어갈 수 있다. 시료의 표면 형상을 측정하기 위해서는 비교적 단순한 작업만으로도 가능하다.

먼저 적절한 bias 전압과 터널링 전류를 결정하고 안정상태에 도달한 후 x -와 y -축에 해당하는 전압을 PZT 주사기로 내보내어 xy -면에서의 좌표를 결

정한 후 그때의 역되먹임 회로에서 공급되는 z -축의 전압을 A/D 변환기로 읽어들인다. 이 전압값은 PZT 주사기의 z -좌표를 결정하는 값이므로 이때의 xy -좌표상에서의 시료의 높이를 나타낸다. 계속하여 xy -평면상을 주사하면서 계속 z -축의 전압을 읽어 기록하면 시료의 표면형상을 측정할 수 있다. 단 이때 주사속도를 너무 빠르게 하면 역되먹임 회로가 시료의 표면형상을 충분히 따라가지 못하므로 적절한 주사속도를 유지해야 한다. 이 방법은 탐침의 주사중 터널링 전류가 항상 일정하게 유지되므로 일정전류 모드(constant current mode)라고 부른다.

한편 공기중에서와 같이 주위의 온도변화가 심할 경우 STM의 구성부품들의 열팽창에 의해서 측정자료의 왜곡이 심하게 된다. 이 경우에는 가능한 주사속도를 빨리할 필요가 있는데 속도가 역되먹임 회로의 반응속도보다 너무 빠르면 탐침은 시료의 표면형상을 따라가지 못한다. 그대신 주사중 탐침과 시료표면의 거리가 변하므로 위치에 따라 터널링 전류가 변화한다. 이 전류의 변화를 해석하여 시료표면의 형상을 재구성할 수 있다. 이 측정방법을 일정높이모드(constant height mode)라고 부른다.

진공중에서 STM을 사용할 경우는 온도변화가 아주 작으므로 일정높이모드를 사용할 필요가 없으며 시료의 측정범위에 따라 시료와 탐침의 상대적인 운동속도가 달라지므로 깨끗한 화상을 얻을 수 있는 적절한 주사속도를 선택한다. Spectroscopy 등의 목적을 위해서는 같은 xy -좌표상에서 bias 전압을 변화시키거나 탐침과 시료와의 거리를 변화시키는 등의 작업이 필요한데 앞에서 언급한 것과 같이 analog switch와 D/AC 및 A/DC 등을 조합해서 간단히 수행할 수 있다.

5.3. 화상처리

얻어진 측정자료는 시료의 3차원 표면형상이므로 2차원 화면에 알아보기 쉽게 표시해야 한다. 가장 간단한 방법은 수평축을 x 로 잡고 약간 기울어진 수직축을 y 로 잡아 이웃하는 x 좌표들을 선으로 연결하면서 높이 정보를 수직방향으로 이동시켜 표시하는 것이다. 이 방법으로도 무난하지만 복잡한 표면형상이나 굴곡이 심할 경우는 뒷부분이 가려서 보이지 않기도 하는 등의 단점도 따르게 된다.

다른 한 가지 방법은 시선을 z-축을 따라 고정시켜 xy-평면에 투영시키는 것으로 x와 y축을 각각 수평축과 수직축으로 잡고 높이정보는 밝기로 나타내는 방법이다. 이 경우 프로그램이 매우 간단하고 형상을 알아보기도 쉬우며 다른 사람과의 자료를 쉽게 비교할 수 있는 등의 이점이 있으므로 이 방법은 많이 사용된다. 그의 입체감을 살리기 위해 위의 두 가지 방법을 혼합하여 같이 사용하는 수도 있다.

측정자료는 개별적으로 나타내는 것보다 한꺼번에 여러개를 동시에 나타내면 비교하기 쉽고 여러개의 차이점을 확인하기도 쉽다. 이를 위하여 Windows 3.1을 기반으로 한 프로그램을 만들었다. 그 한 예가 Fig. 8에 나타나 있다. 한 화면에 동시에 24개의 측정자료가 표시되며 각각의 자료는 자세한 분석을 위해서 좀더 큰 화면으로 이동된다. 각 자료의 선택은 단순히 mouse를 그 자료의 화면 위에 두고 double-click을 함으로써 수행된다. 옆에 같이 있는 다른 화면은 측정자료의 영역내에서 어떤 선택된 줄을 따라가면서 그 높이를 나타내는 기능이다. Fig. 8에서 오른쪽 화면에 그어진 선을 따라갈 때 그 높이가 왼쪽 작은 화면에 나타나 있다.

오른쪽 화면과 왼쪽 화면은 전체 화면중 어디로나 이동이 가능하며 이것은 Windows의 독특한 기능중 하나이다. 오른쪽 화면은 다시 2배 및 4배의 줌 확대가 가능하며 그때의 각 지점의 명암은 최고점과 최저

점을 기준으로 하여 다시 규격화되므로 더욱 뚜렷한 화상을 얻을 수 있다.

6. 시료 관찰

6.1. 탐침 준비

시료의 표면원자들과 탐침사이의 작용에 관해서 완전히 이해가 되어 있는 것은 아니다. 공기중에서 시료를 관찰할 경우는 시료의 표면이 수분이나 먼지, 유기물등의 불순물로 오염될 수가 있고 또 탐침의 끝부분이 산화될 경우도 많으므로 측정중 터널링 전류에 큰 영향을 미쳐 측정결과와 신뢰성에 문제가 생길 수 있다. 따라서 신뢰성 있는 결과를 위해서는 초고진공(UHV : Ultra High Vacuum) 환경을 만들어 주는 것이 좋다. 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 KOH 수용액속에서 전기화학적 부식으로 끝을 뾰족하게 만들면 무난하다. 가공된 탐침들을 400배 정도의 광학 현미경으로 검사하여 끝부분의 곡률반경을 확인할 수 없을 정도로 뾰족한 것을 골라 사용한다. 공기중에서는 빨리 산화되어 산화막으로 덮이므로 진공중에 들어가서는 다시 고속의 전자빔을 충돌시켜 산화막을 벗겨내야 한다. 그 방법으로는

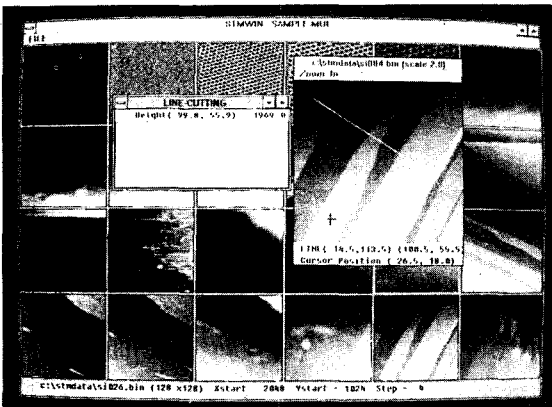


Fig. 8. The image analysis program on windows 3.1. Each image on the background can be transferred to the specific window for further analysis.

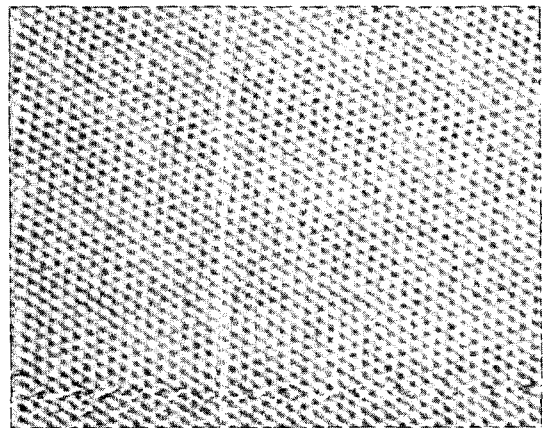
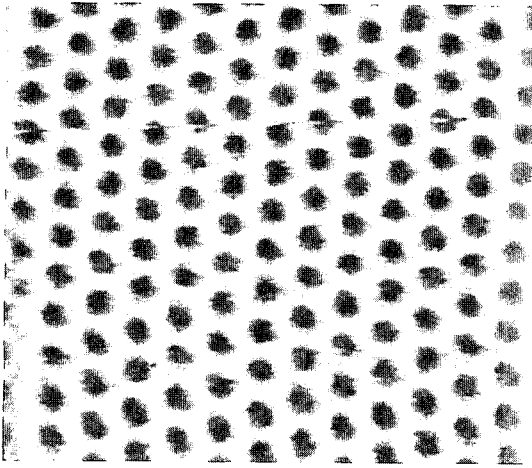


Fig. 9. (a) The large area image of a highly oriented pyrolytic graphite. The scan area is $110\text{\AA} \times 110\text{\AA}$.



(b) The magnified image from (a). The scan area is $32\text{\AA} \times 32\text{\AA}$.

탐침의 바로 앞부분에 열선을 두고 밝은 빛이 날 때까지 전류를 통과시키면서 열선에 대하여 탐침에 고압의 양의 전압을 걸어서 열전자를 탐침에 충돌시킨다. 이렇게 하여 탐침끝에 붙어있는 산화막이나 불순물들을 제거시키면 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

6.2. 시료 준비

상태가 좋은 시료를 준비하는 것은 가장 중요한 일이다. STM은 터널링 전류를 이용하므로 시료의 청정도 등에 매우 민감하다. 그래서 약간의 유기물 등으로 오염이 되어 있을 경우 실제 이상으로 화상의 왜곡이 일어나므로 시료의 표면은 화학적 조성이 균일하고 깨끗하도록 준비되어야 한다.

실리콘의 경우 깨끗한 시료를 준비하는 방법은 진공중에서 벽개하거나 전기를 통하여 가열하여 표면의 산화막을 날려버리는 것이다.

GaAs의 경우 벽개는 간단히 할 수 있으나 가열 방법은 간단하지 않다. 이때는 As가 더 많이 빠져나가기 때문에 원래 의도했던 균일한 시료를 얻기 곤란하므로 As 기체가 많은 분위기에서 가열해야 한다. 그 외 특별한 경우에는 수소나 황 등으로 시료표면의 원자결합들을 안정화시켜 더 이상의 산화나 반응을 억제시키기도 하고 금등의 잘 퍼지는 금속으로 얇게 증착하는 등의 방법을 사용하기도 한다.

6.3. 관찰

제작된 STM으로 구조가 잘 알려진 흑연단결정과 실리콘에 대해 측정을 하였다. 각각의 경우에 개략적인 서술을 해 나가기로 한다.

먼저 흑연결정의 경우는 가장 쉽게 원자적인 분해능을 얻을 수 있는 시료이다. 공기중에서 바로 측정할 수 있고 시료를 준비하기도 쉬우며 구조가 잘 알려져 있는 물질이므로 STM의 측정결과를 비교하기도 쉽다. 탐침은 텅스텐이나 백금-이리듐 선을 부식시키거나 잘라서 사용하며 시료는 접착테이프를 이용해 벽개하여 깨끗한 면을 노출시킨다. 터널링 전류가 1nA 전후, bias 전압이 50mV에서 1V 전후로 하면 3중 대칭형의 벌집구조나 그와 유사한 규칙적인 배열을 볼 수 있다. 대칭성이 6방향인 것은 표면에서 2층 이상을 고려할 때 3중 대칭이 되기 때문이다. 흑연 결정은 그 격자상수가 매우 작은데도 불구하고 깨끗한 화상이 얻어진다는 점때문에 그 측정작용에 대한 논란이 많았고 경우에 따라서는 흑연결정의 강한 탄성계수 때문에 순수한 STM의 원리가 아닌 불순물이 매개된 다른 작용으로도 비슷한 결과가 얻어질 수 있다는 것이 보여지기도 했다. Fig. 9는 흑연의 결정에 대해 얻어진 결과중 하나이다.

실리콘은 반도체소자의 재료라는 점에서 가장 큰 관심을 끌어왔고 폭넓게 연구되었다. 실리콘 그 자체의 성질 뿐만 아니라 반도체-반도체, 반도체-금속, 반도체-유전체 간의 결합등의 성질들에 대해 많은 연구가 되어 오고 있다. 그러나 실리콘의 경우 매우 활성이 강하기 때문에 개별 원자수준의 연구를 위해서는 10^{-10} Torr 이하의 초고진공을 유지해야 하며 시료 준비도 같은 조건에서 해야 한다. Fig. 10에 실리콘을 (111) 면으로 벽개했을 때의 단일원자층 두께의 계단들이 보이며 깨끗한 부분으로 확대해 들어갔을 때 형성되는 준안정상태의 2×1 구조가 보인다.

7. 결 론

진공도가 10^{-11} Torr 수준에서 작동이 되는 STM을 제작하였다. 제작에 필요한 기계적인 구조와 제어를 위한 전자회로 및 컴퓨터 접속 등을 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법으로 구성하였고 제작된 STM을 이용하여 흑연 단결정과 실리콘에 대해 측정하였다.

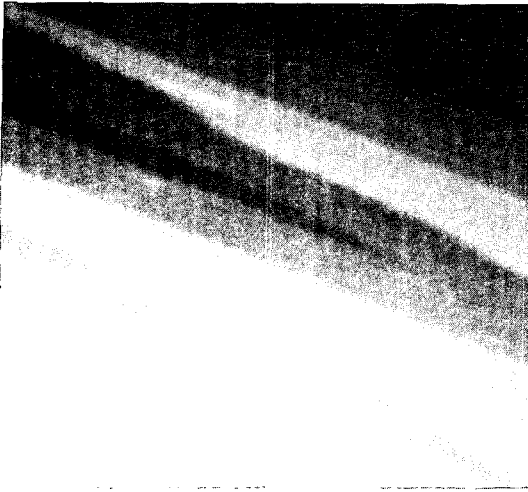
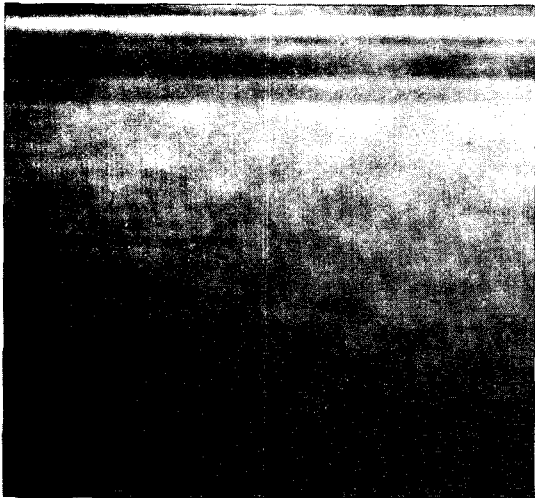


Fig. 10. (a) The monatomic steps on the cleaved Si (111) surface.



(b) The metastable 2×1 structure on the cleaved Si(111) surface.

STM 제작 및 시료준비때의 여러가지 구체적인 문제 점들에 대해 서술하였으며 이것들은 다른 시료들을 관찰할 때도 그대로 적용이 될 수 있다.

참 고 논 문

- 1) R. Young, J. Ward, and F. Scire, Rev. Sci. Instrum. 43 (1972), pp.999
- 2) G. Binnig and H. Rohrer, Rev. Mod. Phys. 59 (1987), pp.615
- 3) I. Giaever, Rev. Mod. Phys. 46 (1974), pp.245
- 4) W. A. Thompson and S. F. Hanrahan, Rev. Sci. Instrum. 47 (1976), pp.1303
- 5) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 50 (1983), pp.220
- 6) D. Ruger and P.Hansma, Phys. Today (Oct. 1990), pp.23
- 7) J. Tersoff and D. R. Hamann, Phys. Rev. Lett. 50 (1983), pp.1998
- 8) P. K. Hansma and J. Tersoff, J. Appl. Phys. 61, RI(1987)
- 9) Y. Kuk and P. J. Silverman, Rev. Sci. Instrum. 60 (1989), pp.165
- 10) R. M. Tromp, J. Phys. : Condens. Matter 1 (1989), pp.10211
- 11) G. Binnig and H. Rohrer, Scientific American (Aug.1985), pp.40
- 12) G. Binnig and D. P. E. Smith, Rev. Sci. Instrum. 57(1986), pp.1688
- 13) J. A. Stroscio, R. M. Feenstra, and A. P. Fein, Phys. Rev. Lett. 57 (1986), pp.2579
- 14) S. Park and C. F. Quate, Rev. Sci. Instrum. 58 (1987), pp.2004
- 15) P. K. Hansma and J. Tersoff, J. Appl. Phys. RI(1987), pp.61
- 16) L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics Wiley & Sons, New York(1982), pp.78-95
- 17) J. Y. Koo, S. Lee, Y. H. Kim, and H. S. Lew, Res. Nondestr. Eval. 3 (1991), pp.171

Construction of UHV Scanning Tunneling Microscope

Ja-Yong Koo, Dal Hyun Kim, Hae Won Park,
Goo Young Kim and Sekyung Lee
Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract A scanning tunneling microscope has been built, which can resolve atomic arrangements of conductors and semiconductors in ultra high vacuum below 10^{-11} Torr. Its background and operational principles are reviewed and the guide lines in building the scanning tunneling microscope are shown. The results of measurements for highly oriented pyrolytic graphite and Si(111) surface are presented.

(Received : May 11, 1994)