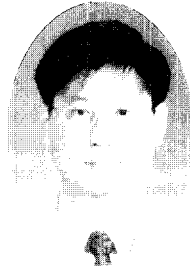


나노세계의 열쇠－원자현미경



박상일

(NRL 나노계측분석연구실 연구책임자)

1. 서론

나노테크놀로지(NT)는 원자나 분자 크기의 극미세 세계에서 물질의 구조와 특성을 규명하고 이를 조작, 제어하는 기술로서 IT, BT와 더불어 21세기 핵심기술로 주목 받고 있다. 산업의 발전은 기술의 발전과 밀접한 관계가 있어 왔는데, 과거에 기계공학, 전기 전자공학 등이 산업발전을 주도했듯이 앞으로는 NT가 산업발전의 견인차 역할을 할 중요한 기술이기 때문이다.

얼마 전까지만 해도 원자나 분자단위의 나노세계는 너무나 미세하여 아무리 좋은 현미경으로도 볼 수 없는 미지의 영역이었다. 이러한 나노세계를 열 수 있는 열쇠가 1980년대에 발명된 원자현미경(SPM : Scanning Probe Microscope)[1]이다. 원자현미경의 효시는 STM(Scanning Tunneling Microscope)[2]이며 가장 널리 쓰이는 원자현미경은 AFM(Atomic Force Microscope)[3]으로서 STM을 발명한 IBM의 비니히(G. Binnig)와 로러(H. Rohrer)는 1986년도 노벨 물리학상을, AFM을 비니히와 공동 발명한 스탠포드 대학의 퀘이트(C. Quate)교수는 1992년도 미국 국가과학메달을 각각 수상한 바 있다.

‘원자는 너무 작아서 (0.1-0.5nm) 아무리 좋은 현미경으

로도 볼 수 없다’는 기존의 통념을 깨뜨린 원자현미경은 제 1세대인 광학현미경과 제 2세대인 전자현미경 다음의 제 3세대 현미경으로 자리 잡아가고 있다. 광학현미경의 배율이 최고 수천 배, 전자현미경(SEM)의 배율이 최고 수십만 배인데 비해서 원자현미경의 배율은 최고 수천만 배로서, 개개의 원자를 관찰할 수 있는 분해능을 가지고 있다. 투과식 전자현미경인 TEM도 수평방향의 분해능은 원자단위이나 수직방향의 분해능은 훨씬 떨어져 개개의 원자를 관찰할 수는 없다. 원자현미경의 경우 수직방향 분해능은 수평방향 보다 더욱 좋아서 원자 지름의 수십분의 일 (0.01nm) 까지도 측정해 낼 수 있다. 이와 같이 경이적인 분해능으로 나노 세계를 직접 관찰함으로써 이제 까지 알 수 없었던 여러 가지 극 미세 세계에 대한 의문을 해결하는 것은 물론 원자 하나 하나를 움직이거나 물질 표면을 원자단위로 변형 시켜서 글자를 쓰는 등 이전에는 상상하기 힘든 일들을 해내고 있다.

원자현미경은 영어의 직역에 충실하게 ‘주사탐침현미경’ 또는 ‘원자간력현미경’ 등으로 불리기도 한다. 여기서는 원자현미경과 특히 표면 전위, 표면 저항 등 시료의 전기적 특성을 측정하는 EFM(Electrostatic Force Microscope)에 대하여 설명하겠다.

2. 여러 가지 형태의 원자현미경

2.1 STM(Scanning Tunneling Microscope) : 원자현미경의 표시

원자현미경계열 현미경중 처음으로 등장한 STM의 기본 원리는 그림 1에서 보여주듯 아주 간단하다. 가느다란 텅스텐 선을 전기 화학적으로 식각 시키면 그 끝이 아주 뾰족하게 되어 맨 끝에는 원자 몇 개만이 있게 된다. 이처럼 예리한 바늘을 고온에서 강한 전기장으로 더욱 예민하게 하고 부식 중에 생긴 산화막을 없애면 훌륭한 STM 탐침(探針)이 된다. 이러한 탐침을 전도체인 시료 표면에 원자 한 두개 크기의 간격($\sim 0.5\text{nm}$)으로 가까이 접근시키면 비록 두개의 도체가 떨어져 있지만 그 간격이 아주 작아서 양단간에 적당한 전압을 걸어주면 전자가 에너지벽을 뚫고 지나가 전류가 흐르는 양자역학적 터널링(Tunneling) 현상이 일어난다. 이는 마치 우리가 땅바닥의 작은 틈새를 뛰어넘을 수 있는 것과 비슷한 이치이다. 이 틈새가 점점 멀어지면 뛰어넘을 수 있는 확률이 급격히 낮아지는 것과 마찬가지로 STM의 탐침과 시료 간격이 멀어지면 전자의 터널링 확률이 급격히 낮아져 전류가 급격히 줄어든다. STM의 탐침은 피에조 세라믹으로 만들어진 구동기(scanner)에 의해 상하, 좌우, 전후로 움직여지며, 이 구동장치는 0.01nm 이상의 정밀도를 가지고 있다. 탐침을 통해 흐르는 전류가 일정한 값이 되도록 탐침의 높이를 조정하면서 좌우, 전후로 주사(走査)해 가면 탐침이 시료 위를 저공 비행하듯이 따라가게 된다. 이 때 각 지점에서 탐침을 상하로 움직여준 값을 기록하여 얻어진 수치를 컴퓨터 화면에 밝기로 나타내면 시료의 지형을 나타내는 사진이 된다. 일단 이 사진이 얻어지면 위에서 본 형상뿐 아니라 각 부분의 굴곡도는 물론

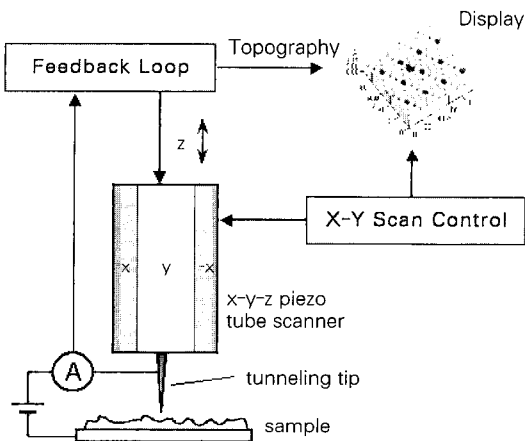


그림 1. STM의 구조도. 탐침(tunneling tip)과 시료 사이에 흐르는 터널링 전류가 일정하게 유지되도록 탐침의 높이를 조정하면서 수평방향으로 움직여가면 시료의 형상을 알 수 있다.

단면도, 입체도 및 각종 통계자료를 얻을 수 있다.

2.2 AFM(Atomic Force Microscope) : 가장 보편적인 원자현미경

STM의 가장 큰 결점은 전기적으로 부도체인 시료는 볼 수 없다는 것인데, 이를 해결하여 원자현미경을 한층 유용하게 만든 것이 AFM이다. AFM에서는 텅스텐으로 만든 바늘 대신에 마이크로머시닝으로 제조된 캔틸레버(Cantilever)(4)라고 불리는 작은 막대를 쓴다. 캔틸레버는 길이가 $100\mu\text{m}$, 폭 $10\mu\text{m}$, 두께 $1\mu\text{m}$ 로서 아주 작아 미세한 힘에 의해서도 아래위로 쉽게 휘어지도록 만들어졌다. 또한 캔틸레버 끝 부분에는 뾰족한 바늘이 달려 있으며, 이 바늘의 끝은 STM의 탐침처럼 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하다.(그림3) 이 탐침을 시료 표면에 접근시키면 탐침 끝의 원자와 시료표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따라 끌어당기거나(인력) 밀치는 힘(척력)이 작용한다.(그림4)

Contact mode의 AFM에서는 척력을 사용하는데 그 힘의 크기는 $1-10\text{nN}$ 정도로 아주 미세하지만 캔틸레버 역시 아주 민감하므로 그 힘에 의해 휘어지게 된다. 이 캔틸레버가 아래위로 휘는 것을 측정하기 위하여 레이저 광선을 캔틸레버에 비추고 캔틸레버 윗면에서 반사된 광선의 각도를 포토다이오드(Photodiode)를 사용하여 측정한다. 이렇게 하면 바늘 끝

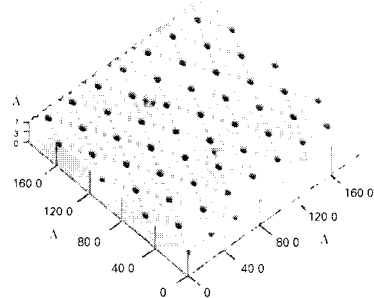


그림 2. 실리콘(111) 표면을 STM으로 찍은 사진. 규칙적으로 배열된 흰 공과 같이 보이는 것들이 실리콘 원자 하나 하나이다. 표면 에너지를 낮추기 위해 원자들이 스스로 7×7 형태로 재구성되어 있다. 왼쪽 가운데 부분에 원자 하나가 없어진 것을 볼 수 있다. ($15 \times 15\text{nm}$).

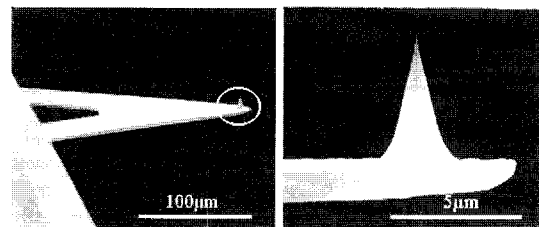


그림 3. AFM에 사용되는 캔틸레버와 탐침의 SEM 사진. 오른쪽 사진은 탐침 부분을 확대한 것이다.

이 0.01nm 정도로 미세하게 움직이는 것까지 측정해낼 수 있다. 바늘 끝의 움직임을 구동기에 역피드백(feedback)하여 AFM의 캔틸레버가 일정하게 휘도록 유지시키면 탐침 끝과 시료사이의 간격도 일정해지므로 STM의 경우에서와 같이 시료의 형상을 측정해낼 수 있다. Non-contact mode의 AFM에서는 원자사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1-0.01nN 정도로 시료에 인가하는 힘이 contact mode에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정하는데 적합하다. 원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 non-contact mode에서는 캔틸레버를 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동 시킨다. 시료표면에 다가가면 원자간의 인력에 의해 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화가 생기고 그 변화를 lock-in amp로 측정한다. 원자간에 상호 작용하는 힘은 시료의 전기적 성질에 관

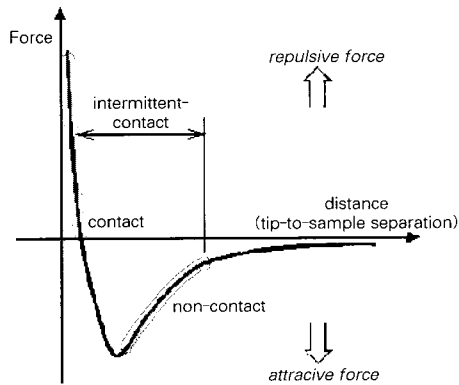


그림4. 원자간력과 거리와의 관계도.

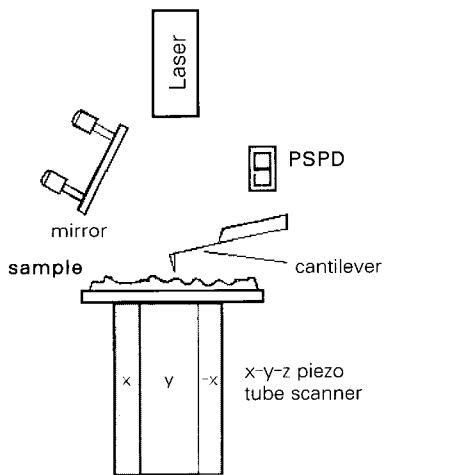


그림 5. AFM의 구조도. 캔틸레버라고 불리는 작은 막대 끝부분에 달려있는 탐침과 시료표면의 원자 사이의 힘에 의해 캔틸레버가 아래위로 휘게 되는데, 이때 레이저 광선이 캔틸레버 뒷면에서 반사되는 각도를 포토다이오드로 측정함으로써 표면의 굴곡을 알아낸다.

계없이 항상 존재하므로 도체나 부도체 모두를 높은 분해능으로 관찰 할 수 있다.

2.3 EFM(Electrostatic Force Microscope) : 시료의 전기적 특성을 재는 원자현미경

Electrostatic Force Microscope(이하 EFM)란 기존 AFM의 탐침과 시료 사이에 전기장(dc+ac)을 인가하여 시료의 전기적 특성, 주로 표면전위(surface charge) [5], 표면전하[6], 화학적 포텐셜(chemical potential), 혹은 capacitance에 영향을 미치는 반도체 불순물 농도, 가둬진하(trapped charge)등 광범위한 정보를 얻을 수 있는 도구이다. EFM은 별도의 센서를 이용하지 않고 PSPD(Position sensitive Photo detector)의 A-B signal을 input으로 lock-in technique을 이용해서 필요한 정보를 얻어낸다. 아래는 EFM의 개요도이다.(그림 7)

위 그림에서 sensing part가 tip-cantilever 그리고 PSPD로 이루어진 점은 AFM과 동일하다. Tip 과 Sample 사이에는 DC+AC의 mixing bias가 인가된다. PSPD에서 나오는



그림 6. Epitaxial 실리콘의 표면을 AFM으로 찍은 사진. 개개의 원자 층이 들쭉날쭉한 모양을 이루며 쌓여있는데 각층의 높이는 0.14nm이다.(0.75×0.75μm).

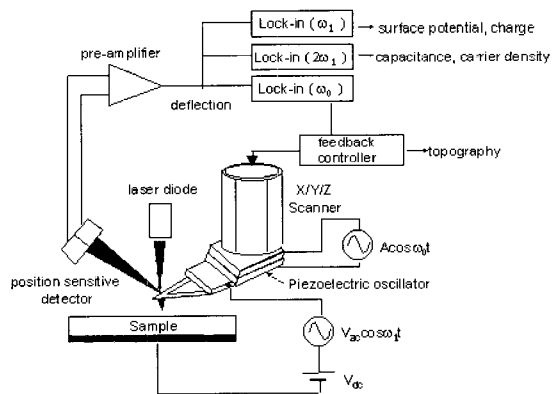


그림 7. EFM의 원리 개요도.

A-B 신호는 cantilever의 static deflection, 인가된 교류전압의 harmonical vibration(1st, 2nd, ...), piezoelectric oscillator의 modulated vibration등 여러 정보를 담고 있다. 이중 static deflection이나 lock-in amp를 거친 piezoelectric oscillator의 변조 신호는 low-pass filter를 거쳐 topography feedback에 이용된다. Tip이 sample에 contact하였을 때 piezoelectric oscillator는 필요없으며 static deflection에 의한 feedback이 이루어지는 반면 noncontact일 때는 piezoelectric oscillator의 변조 신호가 lock-in을 거쳐서 나온 뒤 feedback 된다. 한편, 따로 tip과 sample사이에 인가한 dc+ac 전압은 표면의 전기적 성질에 의해 복잡하게 변조돼 있는데 역시 lock-in amp를 써서 각각 1st, 2nd harmonics signal을 뽑아내 이것의 크기로 필요한 정보를 얻는다. 1st harmonics의 경우 surface potential과 static charge에 대한 정보를 갖고 있으며 2nd harmonics의 경우 capacitance와 charge density에 대한 정보를 담고 있다고 보고 있다.

2.3.1 EFM Family

EFM은 탐침-시료간 정전기력을 이용한다는 점에서는 같으나 세세한 동작모드에 따라 다양하게 분화된다. 우선 비접촉 모드로 구동하는 Scanning Kelvin Probe Microscope (SKPM), Scanning Potentiometry(SP), Scanning Kelvin probe force Microscope(SKM), Scanning Maxwell stress Microscope(SMM)는 주로 bimorph를 이용해서 tip을 공명 주파수 지점에 두고 진동시키고 modulation항에서 1st harmonics로 topography feedback을 한다. Modulation방법에는 Amplitude Modulation(AM), Frequency Modulation(FM) 이 쓰인다. Free oscillation 지역에서 힘을 느끼는 지역까지 근접할 때 공명진동수의 변화가 일어나는

표 1.

Microscope	Mode	Bias	Bimorph	Topography	Image
STP	CT	$V_s + V \cos \omega t$	N/A	$\delta I_s = 0$	$V_s (I_s = 0) = V_s$
SKPM	NC	V_s	ω	AM/FM	$V_s (I_s = 0) = V_s$
SP	NC	$V_s + V \cos \omega t$	ω	AM/FM	$A_s \propto V_s$ $A_s \propto \partial C / \partial z$
SKM	NC	$V_s + V \cos \omega t$	ω	AM/FM	$V_s (A_s \omega = 0) = V_s$ $A_s \propto \partial C / \partial z$
SMM	NC	$V_s + V \cos \omega t$	N/A	$\delta A_s = 0$	$V_s (A_s = 0) = V_s$
DC-EFM	CT	$V_s + V \cos \omega t$	N/A	$\delta A_s = 0$	$A_s \propto \sigma$ $A_s \propto \partial C / \partial z$

STP : Scanning Tunneling Potontimeter
 SKPM : Scanning Kelvin Probe Microscope
 SP : Scanning Potontimeter
 SKM : Scanning Kelvin Probe force Microscope
 SMM : Scanning Maxwell stress Microscope
 DC-EFM : Dynamic-Contact mode Electrostatic Microscope
 CT : Contact mode, NC : noncontact mode
 AM : $\delta A_s = 0$, FM : $\delta \omega = 0$
 A_s, A_c, A_c : dc, ω , 2ω component of cantilever deflection/motion

데 진동의 진폭을 일정하게 하느냐 주파수 변화를 없도록 해주느냐에 따라 각각 AM, FM으로 나뉜다. 한편, 접촉 모드의 EFM은 Dynamic Contact EFM(DC-EFM)과 Scanning Piezo-Response Microscope(SPRM)등으로 대별되는데 bimorph 없이 cantilever의 static deflection으로 topography feedback을 하고 교류전기장을 인가하여 Lock-in으로 harmonics 정보를 얻어내는 것까지는 동일하지만 얻어낸 정보를 각기 표면전하에 의한 효과와 piezo-response에 의한 효과로 달리 해석하는 것이 차이점이다. 여기에 대해서는 아직 완전한 합의가 나지 않은 부분이라 언급만하고 넘어가겠다.

2.3.2 EFM의 detection theory

Tip 이 느끼는 electrostatic force는 tip-sample 사이의 capacitance 의 거리 미분항에서 나온 것, 그리고 표면에 분포해 있을 수 있는 전하에 의한 힘이 있다고 볼 수 있다. 따라서 tip-sample계의 힘은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_v &= F_{cap} + F_{electrostatic} \\
 &= \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dz} + \frac{Q_s Q_t}{4\pi\epsilon_0 z^2} \\
 &= \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} (V_{dc} + V_{ac} \cos \omega t)^2 - \frac{Q_s}{4\pi\epsilon_0 z^2} \\
 &\quad (Q_s + CV_{dc} + CV_{ac} \cos \omega t) \\
 &= \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} \left(V_{dc}^2 + \frac{1}{2} V_{ac}^2 \right) - \frac{Q_s}{4\pi\epsilon_0 z^2} (Q_s + CV_{dc}) \\
 &\quad + \left(2V_{dc} \frac{dC}{dz} - \frac{Q_s C}{4\pi\epsilon_0 z} \right) V_{ac} \cos \omega t + \frac{1}{4} \frac{dC}{dz} V_{ac}^2 \cos 2\omega t
 \end{aligned}$$

최종적인 결과를 보면 힘은 DC항과 ac 전압의 1st harmonics(W) 항, 2nd harmonics(2W)항등으로 나누어진다. W항은 V_{dc} , Q_s 를 포함하고 있어 표면전위, 표면전하에 대한 정보를 담고 있고 2W항은 capacitance의 거리미분항이 있으므로 이에 영향을 줄 수 있는 반도체물질의 도핑농도 등에 대한 정보를 가려낼 수 있다. Vdc는 물론 팁과 반대전극 사이의 상대전위이지만 vacuum gap에서의 전압 강하가 매우 커서 거의 팁끝과 샘플사이의 전위차로 근사할 수 있고 또한 junction에서의 저항을 줄이는 방법으로 그 오차를 줄이기도 한다.

2.3.3 EFM의 다양한 이용

가) 표면전하검출

다음 그림(그림 8)은 실리콘 산화막에 가둔 전하의 EFM 이미지이며 3D로 맵핑한 것이다. 좌의 검은색으로 쭉 들어간 부분과 우의 회색 튀어나온 부분이 대조를 이루고 있다. 팁과 샘플 바닥 전극 사이에 DC 전압을 극성을 달리하여(+10V,

-10V) 인가하여 서로 부호가 다른 전하를 가둔 것을 NC-EFM으로 이미징 한 것이다. 그리고 아래는 A-B라인의 단면 프로파일이다.(그림 9)

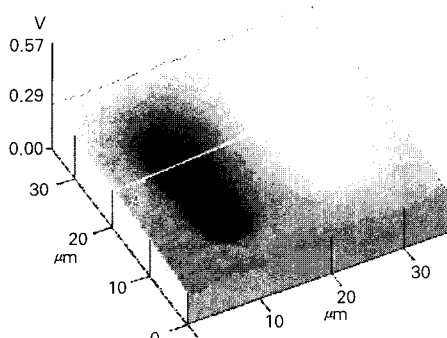


그림 8. 3-D image of the trapped surface charge distribution on silicon dioxide.

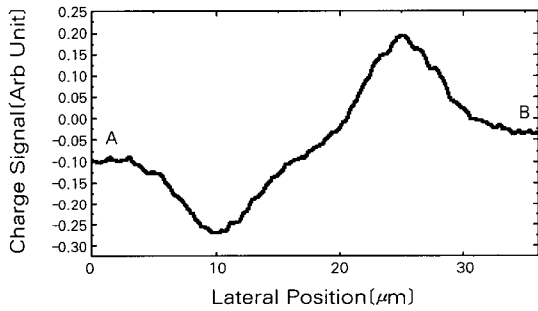


그림 9. The line profile of the trapped surface charge distribution on silicon dioxide.

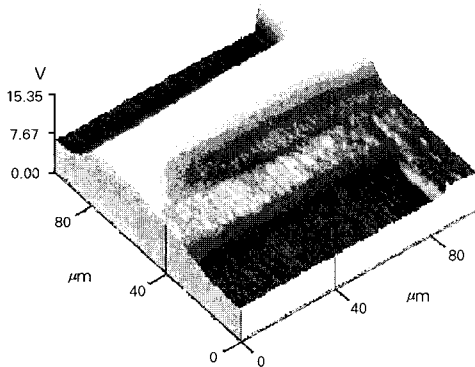


그림 10. 3D image of the potential distribution across u-shaped semiconductor resistor.

나) 표면전위 측정

어떤 샘플 표면의 전위가 부근과 다른 값을 가진다면 분명 그것은 electrostatic force에 영향을 줄 것이다. 하지만 힘의 크기는 거리의 크기에 따라 급감하므로 표면 전위의 절대값을 읽어내려면 다른 방식이 필요하다. 주사형 정전위법(Scanning Potentiometry)는 Lock-in의 W형의 신호를 sample이나 tip에 되먹임(feedback)하는 방법으로 표면에서 생긴 전위차이를 상쇄(nulling)시킨다. 이때 되먹임 정보를 읽으면 그것을 표면전위의 절대값으로 쓸 수 있다. 다음은 U자형의 반도체 저항의 양단에 5V의 전압을 걸고 U자형의 경로를 따라 전위가 ohmic하게 떨어지는 것을 보여주는 결과를 3D 이미지로 보여주고 있다.(그림 10)

다) 반도체 불순물 도핑 농도 분포 맵핑

EFM tip과 sample의 관계는 흔히 전기용량계(capacitance system)로 단순화된다.(그림 11)

금속-산화막-반도체(MOS)구조의 전기용량계에서는 금속(Gate)과 하부 전극 사이에 가해지는 DC전압에 따라 반도체 내부에 비움층(depletion layer)이 생겨날 수 있다. 이 층은 전압과 불순물 도핑농도의 함수인데 이 층이 들어감으로써 기존 산화막 전기용량(C_{ox})에 이 층의 전기용량(C_d)가 직렬 연결된 형태를 띤다. 비슷한 논의가 금속 EFM tip-공기층-산화막-반도체 구조에서 성립한다. 즉 총 전기용량은,

$$\frac{1}{C_{eff}} = \frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d}$$

$$= \frac{z}{\epsilon_0 A} + \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox} A} + \frac{t_d}{\epsilon_s A}$$

앞서 살펴본대로 이 전기용량의 거리미분값이 힘이 된다. 특히 2W항을 다시 보면,

$$F_{2\omega} = -\frac{V_{ac}^2 C_{eff}^2 \cos 2\omega t}{4\epsilon_0 A}$$

즉, 2항의 정보속에 표면 capacitance의 차이, 반도체의 경우 비움층에 대한 정보가 포함되어 있고 모델링을 하여 불순물 농도에 대한 정보까지도 얻어낼 수 있다.

다음은 NC-EFM을 이용하여 topography와 capacitance

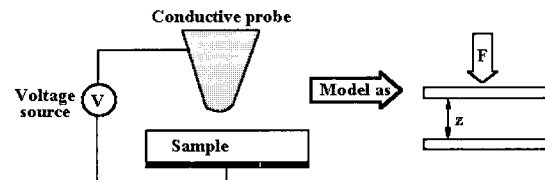


그림 11.

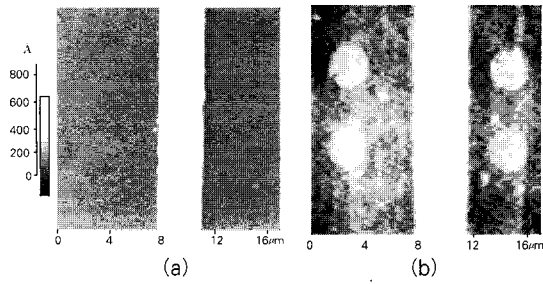


그림 12. Topography image (a) and capacitance image (b) on the nonuniformly doped semiconductor surface.

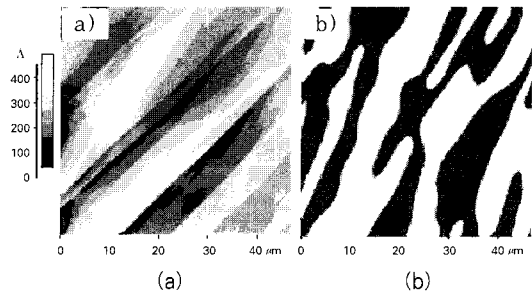


그림 14. The images taken by DC-EFM do not show any correlation between topography (a) and surface charge (b) image.

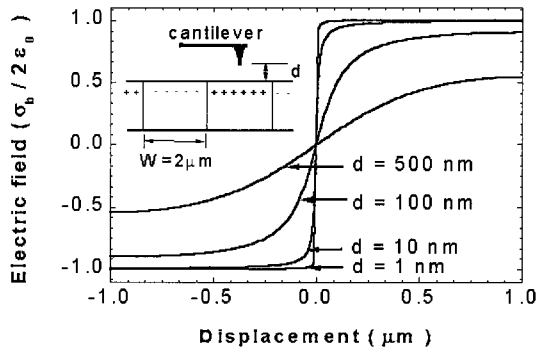


그림 13. Plot of electric field as function of lateral position on the alternating charge strip at four different height from surface.

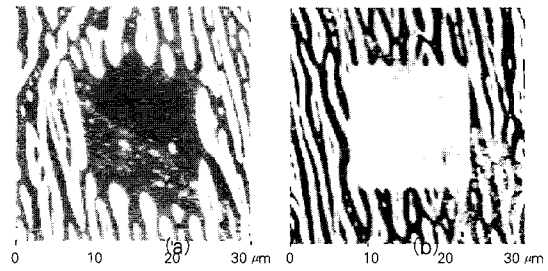


그림 15. (a) A negatively polarized region of $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ in the $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ image. (b) A positively polarized region of $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ in the $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ image.

image를 함께 얻어낸 것이다.

시료는 p-type silicon wafer에 As+로 n-type high doping을 한 것이다. 중앙의 흰색 선(patterned line)양쪽에 원형의 doped region이 보인다.

2.3.4 EFM의 유전체로의 이용

유전체는 외부 전기장에 의해 편극장(polarization field)를 만들어내는 성질이 있다. 유전체 내부에서 편극의 효과는 개개의 분극(dipole)들에 의해서 상쇄되더라도 표면에서는 일정한 전하밀도를 갖고 전기장을 나타낸다. 이러한 표면전하들의 효과는 DC-EFM에서 다음과 같이 나타난다.

$$F_{v,w} = \left(\frac{dC}{dz} V_{dc} + \frac{\sigma_b C}{2\epsilon_0} \right) V_{ac} \cos \omega t$$

다음은 다르게 poling된 유전체의 구역(domain)을 DC-EFM으로 scan할때 느끼는 전기장의 효과를 시뮬레이션 한 것이다.(그림 13)

가)TGS 단결정의 구역 연구

TGS(triglicine sulfate)는 대표적인 강유전체 중의 하나로 실온에서 멀지않은 곳에 임계온도(49도)가 있어서 열전센서(pyroelectric sensor)로도 많이 이용하는 물질이다. 강유전체는 임계온도 이하에서 자발분극(spontaneous polarization)을 가지며 외부 전기장에 의해 그 방향이 바뀌기도 하는 (switching) 물질이므로 DC-EFM으로 단결정의 구역 연구를 하기에는 더없이 좋은 조건을 갖추고 있다. 다음은 TGS 단결정의 b-axis 단면상의 topography와 domain image를 EFM으로 얻은 것이다.

EFM으로 자발분극의 분포를 볼 수 있을 뿐 아니라 개개의 domain들을 switching하고 인위적인 구역을 writing하며 control 할 수도 있다. 다음은 TGS 단결정의 구역을 switching한 그림이다.(그림 14)

왼쪽 그림은 -10V, 오른쪽은 +10V로 DC 전압을 가하며 tip을 정방향의 구역으로 scan한 후 0V DC에서 domain imaging 을 한 것이다.(그림 15)

나) 강유전체 박막으로의 응용

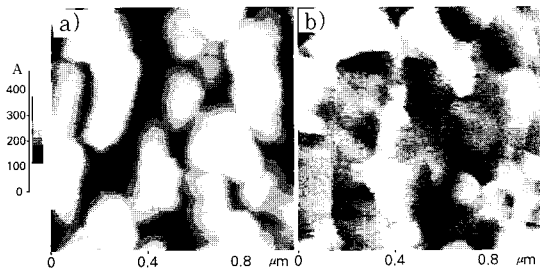


그림 16. Topography (a) and domain contrast (b) images of PZT thin film.

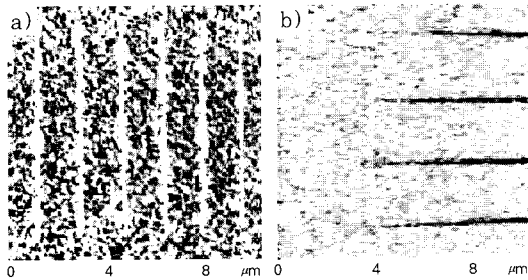


그림 17. Lines (a) and (b) written on a PZT by DC-EFM
Lines (a) were written by applying a bias $V_{ac} = -10V$ to the tip writing speeds for each line were 1nm/s, 10nm/s, 100nm/s, 1 μ m/s, 10 μ m/s and 50 μ m/s from left.
Lines (b) were written by applying a linearly increasing tip bias $V_{ac} = 0$ to 10V to the tip from left.

TGS같이 자발 분극이 큰 단결정의 경우에는 AFM을 이용하지 않고도 구역을 볼 수 있는 방법이 꽤 많다. 하지만 두께가 100nm 내외의 강유전체 박막(film)인 경우에는 작은 구역의 dynamics를 연구할 수 있는 마땅한 tool이 AFM 말고는 딱히 없다. Grain boundary나 trapped charges등 작은 domain의 switching에 영향을 줄 수 있는 요인들은 수십 나노미터 정도의 크기 안에서의 효과를 고려해야 하기 때문이다. 이러한 강유전체 박막들은 앞으로 고집적도의 메모리(FRAM)으로의 응용이 기대되기 때문에 AFM(EFM)을 이용한 최근의 연구결과들이 많이 나와 있다.

아래는 대표적인 강유전체 박막인 PZT 박막을 갖고 EFM으로 domain contrast를 얻어낸 그림이다.(그림 16)

왼쪽은 topo상의 grain image이고 오른쪽은 동시에 얻어낸 domain(구역)의 모습이다. 한편, EFM으로 DC 전압을 증가 또는 감소시켜 가면서 박막의 switching field point를 알아볼 수도 있다. 아래 a)는 scan speed를 1nm/s에서 50 μ m/s까지 다양하게 변화시키면서 -10V로 write를 한 경우이고, b)는 0V에서 10V까지 DC전압을 증가시키면서 line writing

을 한 경우이다. 대략적인 domain reversal point는 4V정도이다.(그림 17)

3. 결론

나노미터 단위의 극미세 세계를 가시화하여 NT시대를 여는데 크게 기여한 원자현미경 기술은 지속적으로 발전되어왔다. 초기에는 원자의 배열 등을 보여주는 연구용 장비로 주로 사용되었지만, 점차 시료의 여러 가지 특성을 알아내는 분석장비로 발전하였고 이제 정확도가 대폭 개선되어 반도체, 평판 디스플레이 제조 공정용 정밀 계측장비로 사용되기에 이르렀다. 원자현미경은 진공 상태나 대기중 뿐 아니라 액체 내에서도 작동하므로 살아있는 세포내의 구조나 세포 분열 등을 관찰할 수 있다. 전자현미경이 진공 상태에서만 가능하다는 것을 감안하면 원자현미경의 응용범위가 대단히 넓다고 할 수 있다. 원자현미경은 관찰, 측정에 그치지 않고 나노리소그래피(nano-lithography: 사진묘사), 나노머시닝(nano-machining: 절삭), 또 나노로봇(nano-robot)으로도 사용될 수 있어 원자, 분자 단위의 물질 조작이 가능하다. 또한 물질의 자기적, 기계적, 광학적 특성등도 측정할 수 있는 MFM(Magnetic Force Microscope)[7], LFM(Lateral Force Microscope)[8], FMM(Force Modulation Microscope), PFM(Pulsed Force Microscope)[9], EC-SPM(Electrochemistry Scanning Probe Microscope), NSOM(Near-Field Scanning Optical Microscopes)[10] 및 시료 표면의 온도 분포를 재는 SThM(Scanning Thermal Microscope)[11] 등이 상용되고 있다. 지금도 원자현미경은 발전 도상에 있으며 앞으로 더욱 발전하여 나노 세계에서의 눈과 귀와 손의 역할을 감당해 나갈 것으로 예상된다

참고 문헌

- [1] For comprehensive reference see "Scanning probe microscopy and spectroscopy" by R. Wiesendanger, Cambridge University Press, 1994.
- [2] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, "Surface studies by scanning tunneling microscopy." Phys. Rev. Lett., Vol. 49, p. 57, 1982.
- [3] G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber, "Atomic force microscope." Phys. Rev. Lett., Vol. 56, p. 930, 1986.
- [4] P. Maivald, H. J. Butt, S. A. C. Gould, C. B. Prater, B. Drake, J. A. Gurley, V. B. Elings, and P. K. Hansma, Nanotechnology, Vol. 2, p.

103, 1991.

- [5] Y. Martin, D. W. Abraham, and H. K. Wickramasinghe, "High-resolution capacitance measurement and potentiometry by force microscopy." Appl. Phys. Lett., Vol. 52, p. 1103, 1988.
- [6] J. W. Hong, G. H. Noh, Sang-il Park, S. -I. Kwun, and Z. G. Khim, "Surface charge density and evolution of domain structure in triglycine sulfate determined by electrostatic-force microscopy." Phys. Rev. B, Vol. 58, p. 5078, 1998.
- [7] D. Rugar, H. J. Mamin, P. Guethner, S. E. Lambert, J. E. Stern, I. McFadyen, and T. Yogi, "Magnetic force microscopy: General principles and application to longitudinal recording media." J. Appl. Phys., Vol. 68, p. 1169, 1990.
- [8] G. Meyer and N. M. Amer, "Simultaneous measurement of lateral and normal forces with an optical-beam-deflection atomic force microscope." Appl. Phys. Lett., Vol. 57, p. 2089, 1990.
- [9] <http://www.witec.de/pfm.html/>
- [10] E. Betzig, M. Isaacson, and A. Lewis, "Collection mode near-field scanning optical microscopy." Appl. Phys. Lett., Vol. 51, p. 2088, 1987.
- [11] C. C. Williams and H. K. Wickramasinghe, "Scanning thermal profiler." Appl. Phys. Lett., Vol. 49, p. 1587, 1986.

저 자 약 력

성명 : 박상일

❖ 학 력

- 1981년 서울대 물리학과 공학사
- 1986년 미국 Stanford대 응용물리학 공학박사
- 1994년 AEA-Stanford Executive Institute 최고 경영자 과정 수료

❖ 경 력

- 1987년 - 1990년
미국 Stanford대 Research Associate
- 1988년 - 1997년
미국 법인 Park Scientific Instrument (PSI) 대표이사
- 1997년
한국 법인 PSIA(주) 창업
- 1998년 - 2001년
벤처기업협회 이사
- 1997년 - 현재
PSIA사 대표이사
- 2000년 - 현재
국가지정연구소(NRL) 나노계측분석 연구실 연구책임자