

주사형 맥스웰응력 현미경에 의한 표면의 전기적 이미지

신훈규, 권영수
 동아대학교 전기공학과

Electrical Imaging of Thin Film Surface by Scanning Maxwell-stress Microscopy

Hoon-Kyu Shin, Young-Soo Kwon
 Dept. of Electrical Eng., Dong-A University

Abstract - Recent development of scanning probe microscope techniques has made it possible to investigate, not only microscopic surface topography, but also physical and chemical properties on the nanometer-scale. The scanning Maxwell-stress microscopy (SMM) is surface characterization tool capable of mapping both the surface topography and electrical properties, such as surface potential, surface charge, dielectric constant of thin films with a nanometer-scale resolution by means of the AC voltage driven oscillation of metal coated cantilever.

In this study, we observed the surface potential distribution and molecular ordering in thin films. We have demonstrated that the SMM can be used for imaging surface potential distribution over the film surface and also be used for detecting surface changes in thin films. This is first step towards the understanding of electrical phenomena in organic and inorganic materials, biological system with SMM.

(Scanning Probe Microscopy, SPM) 기술은 최근 급속한 발전을 거듭하여, 현재는 표면의 형상 측정에 국한되지 않고 여러 가지 물성·기능까지 국소적으로 관측이 가능한 표면 해석기술로서 현저한 발전을 보이고 있다.^{5,6}

주사형 맥스웰응력 현미경(Scanning Maxwell-stress Microscopy, SMM)은 표면전위, 유전율 등의 전기물성 해석을 위한 Nanometer order의 분해능을 가진 SPM이다. SMM은 AFM과 마찬가지로 탐침에 작용하는 힘을 검출하는 형태의 SPM이기 때문에 외부 교류전압에 의해 유기되는 강제진동 전기력 측정만으로 표면의 여러 가지의 전기적 정보를 표면형상과 동시에 검출할 수 있는 특징이 있다.⁷ 따라서, 일반적인 AFM에 간단한 외부장치를 추가함에 따라 사용 가능한 SMM이 실현될 수 있다. 그리고, 환경과 조건의 제약이 적기 때문에 수중과 같은 점성이 높은 상태에서의 동작도 원리적으로 가능한 특징이 있다. 따라서, SMM의 이러한 특징을 이용하면 물질조사를 위하여 유·무기에 관계없이 관찰이 가능하다. 여기서는 시스템의 원리, 표면형상과 표면전위 등의 측정 결과를 보고하며, 이 시스템의 응용가능성을 확인하였다.

1. 서론

표면전위를 비롯한 표면의 전기물성의 관측은 콜로이드, 생체막, 전자 디바이스 등의 구조와 물성에 관한 새로운 정보를 제공하므로 그 응용범위는 매우 광범위하다. 최근의 Nano-science, Nano-technology의 흐름 중에서 미시적 영역에서의 표면 전기특성의 측정에도 많은 관심이 기대되고 있다.¹

원자간력현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)으로 대표되는 주사간력현미경(Scanning Force Microscopy, SFM)은 미소한 판스프링(탄성) 반응을 이용, 시료와 예리한 탐침(cantilever) 사이의 간격에 작용하는 미약한 힘($10^{-8} \sim 10^{-12}N$)을 검출하여 표면구조와 물성을 관측하는 새로운 현미경 기술이다. 일반적인 AFM은 탐침을 시료 표면에 직접 접촉(contact mode)하여 이때의 반발력을 검출하는 것이며, 최적의 조건하에서는 원자·분자를 각각 관찰할 수 있는 능력을 가지고 있다고 알려져 있다.²

이것과 다르게 탐침을 시료에 접촉하지 않고(non-contact mode), van der Waals force, 전기력, 자기력 등을 이용한 보다 장거리력의 측정용 SFM도 개발되고 있다.³ 이와 같은 비접촉 모드의 SFM은 탐침이 시료로부터 수nm에서 수십nm의 간격 사이에 존재하기 때문에 원자·분자 레벨의 분해능이 기대된다. 또한, mesoscopic 영역에서의 여러가지 현상에 대해서도 그 직접적 평가를 가능하게 하는 기술로서 대단히 실용적인 의미를 두고 있다.⁴

또한, AFM을 비롯한 주사형 프로브 현미경

2. 주사형 맥스웰응력 현미경의 원리

그림 1에 주사형 맥스웰응력 현미경(SMM)의 개략을 나타내었다. 탐침을 시료에 접근시키는 기본적인 구성은 AFM과 동일하며 도전성 탐침과 기관과의 사이에 교류전압을 인가시켜 그 결과 발생하는 탐침의 진동을 검출하여 관찰된다.

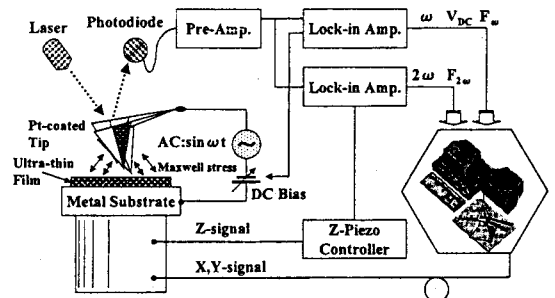


그림 1. SMM의 측정장치 개략도

탐침에 작용하는 힘 F는 전자기학에서 이미 알고 있는 것과 같이 탐침 표면에서의 맥스웰응력 tensor로 계산된다. 금속표면에서 전장은(주파수가 충분히 낮기 때문에) 표면에 수직으로 작용하며, 따라서 맥스웰응력도 법선 방향으로 작용한다. 이 경우 전기변위를 D라 하면, 맥스웰응력 T_{nn} 은 $D^2/2\epsilon_0$ 과 같다. 금속 면에서의 전기변위는 단위면적당의 전하 ρ_s 와 같으므로, 탐침

표면의 법선이 수직을 이루는 각이 θ 이면 탐침에 작용하는 아랫방향의 힘은

$$F = \int_{\theta=0}^{\theta_0} \frac{1}{2\epsilon_0} D^2 \cos \theta ds = \int_{\theta=0}^{\theta_0} \frac{1}{2\epsilon_0} \rho^2 \cos \theta ds \quad (1)$$

로 주어진다.

여기에서 특히, 힘이 표면 전하밀도의 자승에 비례하는 비선형성이 중요하다. 이처럼 SMM은 (표면전하량에 비례하는 전류를 계속하는) 켈빈법의 단순한 확장으로 보는 것은 물리적으로 옳지 않다.

탐침표면의 전하밀도는 탐침 자신보다 전극위의 전위, 또한 시료의 유전율과 전하·분포에 따라 변화한다. SMM은 이러한 특징을 이용하여 역으로 전하밀도(의 탐침표면에서의 가중평균)에서 표면에 관한 정보를 인출하는 방법이다.

SMM의 동작원리를 간단하게 설명하면 다음과 같다. 탐침과 기판을 거리 d 로 이격시켜 면적 S 의 평행판 전극이 존재한다고 하고, 하부전극 위에서는 유전율 ϵ , 두께 d_0 의 유전체층이 있고, 동일한 분극밀도 P 의 얇은 층과 전하밀도 ρ 의 층이 각각 하부전극에서 d_p , d_c ($\ll d_0$)의 거리에 있다고 가정하자. 여기에서 상하전극 간에 V_i 의 전압을 인가할 경우에 상부전극에 발생하는 전하밀도는 다음과 같이 간단하게 계산된다.

$$D = \rho_i = \frac{\epsilon_0 V_i - P - \rho d_c \epsilon_0 / \epsilon}{d - (1 - \epsilon_0 / \epsilon) d_0} \quad (2)$$

그리고 탐침에 작용하는 힘 F 는

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{V_i - P / \epsilon_0 - \rho d_c}{d - (1 - \epsilon_0 / \epsilon) d_0} \right)^2 \epsilon_0 S \quad (3)$$

이다.

여기에서 가장 단순한 경우로서 직류전압 V_{DC} , 진폭 V_{AC} , 주파수 ω 의 교류전압을 중첩한 전압 $V_i = V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t$ 를 탐침에 인가한 경우에서 탐침의 진동을 무시하면 ($d = \text{constant}$), 힘 F 에는 직류의 주파수 ω 및 2ω 의 다른 2개의 진폭성분이 나타난다.

$$F_{\omega} = \frac{V_{DC} - P / \epsilon_0 - \rho d_c}{[d - (1 - \epsilon_0 / \epsilon) d_0]^2} \epsilon_0 S V_{AC} \sin \omega t \quad (4)$$

$$F_{2\omega} = - \frac{1}{4[d - (1 - \epsilon_0 / \epsilon) d_0]^2} \epsilon_0 S V_{AC}^2 \cos 2\omega t \quad (5)$$

이러한 진동력에서 여러 가지 다양한 전기적 정보가 얻어진다.

SMM에 관측되는 유전율 등의 물성량은 위의 전개에서 알 수 있는 바와 같이 인가되는 전압의 주파수에 의한 것이다. 따라서 그때의 주파수분산을 알고 싶을 경우에는 판 스프링의 공진에 의해 주파수의 제한이 큰 장애가 된다.

이러한 관점에서, 식(4), (5)를 다시 보면 F_{ω} , $F_{2\omega}$ 는 각각 DC성분과 AC성분, AC성분과 AC성분이 합해진 주파수 성분이 있는 것을 알 수 있다. 이처럼 SMM의 기능은 맥스웰응력의 비선형성에 본질적으로 관계되어 있다.

3. SMM의 기능과 관찰

SMM을 이용한 관찰 결과를 소개한다. 관찰을 위해서 탄성(스프링)정수 0.58 N/m , 공진 주파수 약 30 kHz 의 시판되는 탐침(Si_3N_4 계)을 이용하였으며, 탐침표면에 sputtering에 의해 백금박막을 형성시켜 탐침이 도전성을 갖게 하였다. 교류전압은 주파수 $5 \sim 10 \text{ kHz}$, 진폭 $1 \sim 4 \text{ Vpp}$ 로 발생하는 탐침의 진동진폭은 $0.5 \sim 4 \text{ nm}$, 또한 Lock-in Amp(Amplification)의 적분시간은 10 ms 이고 scan rate는 0.3 Hz 이하이다.

3.1 표면 형상의 관찰

표면형상의 검출은 SPM 기능에 반드시 필요한 부분이며, 특히 비접촉형의 SFM에서는 그 이상의 의미 있는 관찰은 사실상 불가능하다. SMM에서는 2배 고주파 성분 $F_{2\omega}$ 를 검출하고 이것을 항상 일정하게 유지하여

탐침과 시료와의 거리를 제어하게 된다. 식(5)에 의해서 이것은

$$d - (1 - \epsilon_0 / \epsilon) d_0 = d_{fix} = \text{const.} \quad (6)$$

로 같아진다.

물리적으로, 이것은 시료-탐침간의 정전용량 C 의 미분 dC/dx 가 일정현상을 탐침으로 주사하는 것을 의미한다. 따라서 이 결과로 얻어지는 표면형상은 기하학적인 의미로서의 표면형상과는 일반적으로 일치하지는 않는다. 이것은 STM이 등저항면을 주는 것과 동일한 관련을 가진다. 단, 금속과 강유전체인 경우에서 $\epsilon \approx \infty$ 와 비슷한 경우, SMM은 기하학적인 표면형상을 보여준다.

그림 2에 SMM에 의한 대기 중에서의 표면형상의 관찰결과를 나타내었다. 시료는 Si Wafer위에 형성시킨 박막의 두께는 약 100 nm 의 박막을 반도체 제작공정에 의해 직사각형의 패턴 형태로 가공된 것이다. 또한 박막의 미세구조는 SMM의 분해능을 확인하는데 이용되었다.

SMM에 의해 관찰된 표면형상의 종방향의 분해능 δd 는 식(5)로부터 간단히 유도할 수 있다. 탐침에 작용하는 힘의 전체 잡음진폭을 F_{noise} 라 할 때 Lock-in Amp.의 적분시간이 Δt 의 조건에서는

$$\delta d \approx d \frac{F_{\text{noise}}}{2F_{2\omega}} \left(\frac{2\pi}{\Omega_{\text{res}} d_i} \right)^{1/2} \quad (7)$$

이다(단, 간단하게 $d_0 = 0$, DC에서 $\Omega_{\text{res}}/2\pi$ 의 주파수 영역에 걸쳐 F_{noise} 가 균등하게 분포되어 있다고 가정). 현재 이 system에서는 $F_{\text{noise}} \approx 0.1 \text{ nN}$, $F_{2\omega} \approx 0.5 \text{ nN}$, $d \approx 20 \text{ nm}$ 인 것을 이용하여, $\delta d \approx 0.1 \text{ nm}$ 로 추정되었다. 일단 횡분해능의 추정에는 탐침-시료 계의 3차원적인 전장의 해석이 필요하므로 복잡하다. 그러나 개념적으로는 $1/d_2$ 의 평균이라고 생각해도 좋다. 보다 고배율의 관찰결과에서는 100 nm 이하로 추정할 수가 있다.

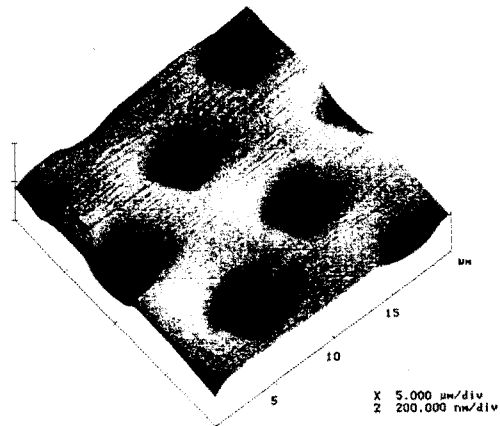


그림 2. 박막의 형상

금속 면에 대해서는 $F_{2\omega}$ 가 탐침 위치제어에 의해 탐침과 시료의 접촉은 원리적으로 일어나기 어려운 표면형상의 관찰이 가능하였다. 그러나 유한한 유전율을 가지는 박막이 존재할 경우에는 사정이 다르다. 이 경우 탐침이 시료 면과 직접 접촉하지 않기($d \gg d_0$) 위해서는 탐침위치의 목표치 d_{fix} 는 $d_{fix} > \epsilon_0 \epsilon d_0$ 를 만족하도록 하지 않으면 안된다. 이 조건은 형상의 측정에는 크게 제한을 주지는 않지만 보다 얇은 유전체막이 존재하는 경우에는 분해능의 현저한 저하와 탐침 위치제어의 불안정 등의 문제점을 일으킨다. 이러한 두께에서의 문제를 본질적으로 해결하기 위해서는 시료표면과 탐침과의 거리를 검출하는 다른 기구가 필요하다. 그림 3에 나타냈듯이 2배 고주파진동의 위상과 탐침-시료 거리간의 관계에서 그 가능성을 보여주고 있다. 탐침상의 맥스웰응력과 진동과의 위상차 ϕ 는,

$$\tan \phi = \frac{\gamma}{m \Omega^2 \epsilon_0} \quad (8)$$

로 주어진다. 대기 중에서의 동작에서는 동기저항이 마찰의 주된 요인이다. 특히, 그림 3에 보여지듯이 탐침이 시료면에 접근하면 $\gamma = \gamma_\infty + 3\eta S^2 / (2\pi d_s^3)$ 에 따라서 탐침과 시료와의 사이의 공기층의 점성저항이 증가한다. 이 성질에서 역으로 진동의 위상에서 탐침과 시료 표면의 거리 d_s 를 구할 수 있다. 이것은 SMM과 scanning near-field acoustic microscope(SNAM)의 복합기능의 하나이다.

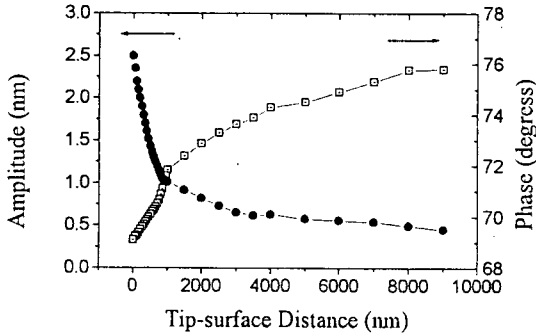


그림 3. 탐침과 시료간의 거리

3.3 표면전위와 전하의 관찰

표면전위 및 전하에 관한 정보는 식(4)에 나타난 것과 같이 기본주파수의 진동에 포함되어 있다. 표면전위 V_s 는 표면흡착과 접촉전위차 등에 의해 생기는 것으로 P/ϵ_0 등이다. 표면전위, 전하의 측정에는 다음과 같은 2가지의 다른 방식이 가능하다.

첫째는 Kelvin법과 같은 모양으로 기본주파수 진동을 0으로 하여 V_{dc} 를 측정하는 것이고 둘째는 탐침의 진폭을 직접 측정하는 방법이다. 첫번째 방법은 표면전위를 직접 읽는 이점이 있지만, calibration에 의한 지연을 위해 응답속도를 지연시키는 결점이 있다. 두번째 방법은 응답속도는 빠르지만 절대측정을 위해서는 비례계수의 calibration이 필요하기에 탐침의 진폭이 첫번째에 비해서 커지는 등의 불리한 점이 있다. 하지만 SMM에서는 $F_{2\omega}$ 가 일정하게 되도록 탐침 위치제어를 위해 식(4), (5)의 비교에서 알 수 있듯이 이들 모두는 비례계수를 제거하여 완전히 같은 정보를 제공해 준다.

그림 4는 Sputtering에 의해 제작된 박막의 표면형상(a)과 동시에 측정된 표면전위상(b)을 나타내고(여기에는 zero점출범을 이용하였다) 있다. 형상에서 박막은 Sputtering에 의해 누적된 박막의 성장 형태가 뚜렷하게 관찰되었으며, 전체의 표면전위는 하나의 형태가 아니라 특히 각각의 경계에서 50mV정도의 현저한 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. SMM에서 관찰된 표면전위는 시료전체에서의 가중평균이고 고배율의 측정에 있어서도 안정한 동일구조가 관찰되므로 경계에서의 전위저하는 Sputtering에 수반하는 구조변화, 오염도 등의 물리적 실험도 반영하는 것이라고 생각되어진다. 한편 Sputtering 박막의 구조는 Si에 비해서 50mV전후의 높은 표면전위를 나타내고 있다.

4. 결 론

주사형 맥스웰 응력 현미경(SMM)의 원리와 그 관찰 결과를 간단히 소개하였다. SMM의 특징을 한마디로 말하면 맥스웰응력의 전장에 대한 비선형성을 직접 측정하는 것이 가능하고, impedance의 미소 probe라고 하는 것이다. 이와 동시에 비공진점에서 동작하는 특징으로 진공과 대기중에서 사용 가능하며, 수중의 점성

저항이 높은 환경에도 적용할 수 있다. 또한 복수주파수의 중첩과 측정에 따라 표면전위, 유전율 등 각종 물성의 측정을, 탐침제어의 기능을 독립으로 병행하여 측정하는 것이 가능하다. 이러한 특징과 더불어 SMM은 금속, 무기, 유기 구별없이 다양한 표면 전기현상의 국소 관측과 image에 응용될 것으로 기대된다.

현재에는 SMM의 공간분해능은 STM, AFM에는 다소 미치지 못하며 단점을 가지고 있지만 큰 발전 가능성을 가지고 있다. 이것의 해결을 위해서는 예리한 탐침과 탐침표면의 전기적 shield 등 여러가지 주변기술도 병행하여 연구중에 있으며, 초진공, 극저온에서도 사용 가능한 장치를 개발중에 있다. SMM을 포함한 다기능 SPM의 연구개발은 현재 가장 급속하게 진전되고 있는 표면분석 기술영역의 하나이다. 따라서, 향후 발전에 그 결과가 주목된다.

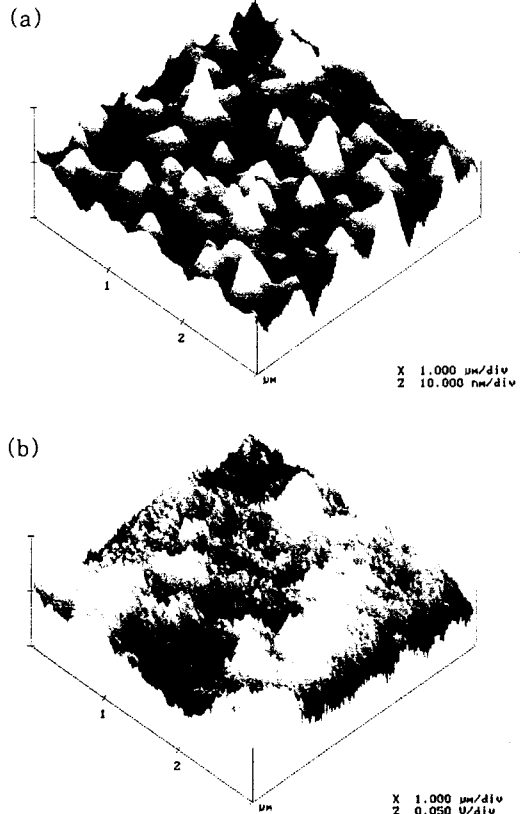


그림 4. 박막의 형상(a) 및 표면전위상(b)

본 연구는 일본 전자기술총합연구소 Dr. Hiroshi Yokoyama의 도움으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] D. Rugar and P. Hansma, Phys. Today 43, 23 (1990)
- [2] D. Sarid, Scanning Force Microscopy (Oxford University Press, Oxford, 1991)
- [3] Y. Martin et al, Appl. Phys. Lett., 52, 1103 (1988)
- [4] J.E. Terris et al, Phys. Rev. Lett., 63, 2717 (1998)
- [5] M. Nonnenmacher et al, J. Vac. Sci & Technol., B 9, 1358 (1991)
- [6] P. Günther et al, Appl. Phys. B 48, 89 (1089)
- [7] H. Yokoyama and T. Inoue, Thin Solid Film, 242, 37 (1994)