나노물질의 저항측정

DOI: 10.3938/PhiT.20.016

김 태 환

Measuring Resistance of Nano-Objects

Tae-Hwan KIM

Making smaller objects toward nanometer scale has been one of the most active trends in science and technology nowadays because nanostructures often reveal various novel properties compared to their bulk counterparts. Understanding material's properties at the nanoscale will help us realize new nanotechnology. For electrical transport, conventional electrodes can alter what we measure during making the electrodes. Here, I introduce a new approach using weakly coupled scanning tunneling probes in order to sense electric transport phenomena through nano-objects such as nanowires and then describe some recent experimental results with the new approach.

들어가는 글

주사터널링현미경(scanning tunneling microscope; 이하 STM)의 발명은 나노과학기술의 입장에서 아주 중요한 사건이었다. STM의 출현으로 다양한 물질의 원자 구조와 전자 구조가 밝혀지고 더 나아가 고체표면에서 원자, 분자의 위치와 전자상태를 제어함으로써 새로운 현상을 관찰하고 분자 하나 혹은 두 개를 이용한 화학반응을 제어할 수 있게 되었다. 또한 STM의 원리를 이용한 다양한 주사탐침현미경(scanning probe microscope)들이 발명되어 STM만으로는 관찰할 수

저자약력

김태환 박사는 서울대학교 이학박사(2005)로서 미국 오크리지 국립연구소(Oak Ridge National Laboratory)의 박사후 연구원을 거쳐 현재 포스텍(POSTECH) 물리학과에서 대우 조교수로 재직 중이다. (taehwan@postech.ac.kr)

없는 다양한 물질의 특성을 나노미터 분해능을 가지고 연구할 수 있게 되었다.

원자단위 분해능을 가지는 STM도 물질의 저항을 정밀하게 측정하는 것은 한계를 가지고 있다. 왜냐하면 적어도 탐침과 시료, 두 개의 전극이 있어야 저항을 측정할 수 있기 때문이다. 이런 문제점을 타파하고자, 하나 이상의 탐침을 가진 STM이 나오게 되었다. 일반적으로 사용되고 있는 고정된 전극을 나노구조에 미리 붙여서 저항을 측정하는 것보다 다양한 응용방법을 보여주기 위해 이 글을 통해서 4개의 탐침(probe)을 가지는 STM(이하 four-probe STM)^[1]을 어떻게 활용할 수 있는지 소개하고자 한다.

Four-Probe STM

물질의 전기적인 성질의 기본은 전기저항이다. 이런 저항은 기본적으로 물질과 전원장치를 연결하고 일정 전압을 가한 후 결과적으로 흐르는 전류의 양을 측정해서 구하게 된다. 물질의 저항이 측정 시 사용하는 전선의 저항과 전선과 물질 사이의 접촉저항보다 충분히 크다면 두 개의 전극만으로 큰 오차 없이 측정 가능하다. 하지만 나노물질처럼 그 크기가 작아져서 전극과의 접촉 면적이 작아지고 그 작아진 접촉면적으로 인해 실제 물질의 저항보다 접촉저항이 커지는 현상이 생길 수 있다. 이때 그림 1처럼 네 개의 전극을 사용하면 접촉저항을 제외한 실제 물질의 저항을 정확하게 얻을 수 있다. 즉, 바깥쪽에 있는 두 전극을 이용해서 일정한 전류를 흘려주고 물질의 저항 때문에 생긴 전압 차이를 안쪽의 두 전극으로 측정하는 것이다. 다만 크기가 작은 나노물질의 경우 전극을 네 개를 동시에 이용하는 일이 쉽지 않아서 다양한 방법으로 전극을 만들고 있다. 그 중의 하나인 전자빔 리토그래피

REFERENCES

- [1] T.-H. Kim *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **78**, 123701 (2007).

Fig. 1. Schematics of four-probe measurement (top) and equivalent circuit diagram (bottom).

(e-beam lithography)를 사용하면 원하는 전극을 만들 수 있는데 제작시간, 비용 및 작업 중의 오염 등의 문제로 연구에 필요한 시료를 준비하는 일이 여전히 쉽지만은 않다.

이런 문제점을 어떻게 해결할 수 있을까? 그림 1에 보이는 것처럼 단순히 아주 날카로운 탐침을 이용하면 될 것이다. 또한 작은 나노물질에 전극들을 접촉해야 하니 나노미터 분해능을 가져야 할 것이다. 우리는 이미 그러한 장비를 알고 있다. 바로 STM이다. 네 개의 독립적인 STM을 하나로 묶을 수만 있다면 앞에서 언급한 문제들은 쉽게 해결될 것이다. 그리하여 기존의 고정된 전극들을 대체하면 다음과 같은 이점을 얻을 수 있다. 첫째, 시료를 적당한 표면 위에 뿌리는 것만으로도 준비할 수가 있고, 경우에 따라서 직접 진공챔버 안에서 분자빔 증착(MBE deposition)을 통해서 성장시킬 수도 있다. 둘째, 터널링 탐침을 사용하기 때문에 시료와 접촉을 나노미터 분해능을 가지고 조절할 수 있기 때문에 원하지 않는 시료의 오염이나 파괴를 최소화할 수 있다. 마지막, 각 탐침들은 독립적으로 시료에 대해서 위치를 옮길 수 있기 때문에 같은 시료에 대해서 탐침간의 거리 혹은 배열을 바꾸면서 다양한 실험을 할 수 있다. 이런 장점 덕분에 기존 방법으로는 측정할 수 없었던 것들을 측정할 수 있게 될 것이다.

정리하자면 four-probe STM은 네 개의 독립적으로 구동 가능한 STM들을 한 진공챔버에 모아 두었다고 생각하면 된다. 그림 2처럼 여기에 각 탐침과 시료의 위치를 확인할 수 있는 전자현미경(scanning electron microscope, SEM)이 있는 것이 일반적인 형태이다. 또한 온도변화에 따른 전기저항의 변화

Fig. 2. Schematics of four-probe STM. Inset shows cryogenic four-probe STM with SEM column and SAM detector.

를 관찰하기 위해서 four-probe STM 전체의 온도를 액체 헬륨 혹은 질소를 이용해서 낮추거나 내부 가열기를 통해서 올릴 수 있기도 한다. 앞으로 four-probe STM을 이용한 몇 가지 실험 결과를 소개하면서 좀 더 자세히 알아보자.

나노선의 전기저항

앞에서도 언급했듯이 four-probe STM의 가장 큰 장점은 그림 3과 같이 시료(여기서는 탄소나노튜브)의 전기저항을 측정할 때 탐침 사이의 거리를 바꾸면서 측정할 수 있기 때문에 고정된 전극보다 더 정밀한 측정을 할 수 있다.^[2] 또한 탄소나노튜브가 얇은 절연층 위에 놓여 있기만 해도 추가적인 공정이 필요치 않다. 다시 말해, 오염에 대한 가능성을 배제할 수 있다.

다만 이런 실험이 가능하기 위해서는 기술적으로 넘어야 할 문제가 있는데 탐침과 시료 사이의 터널링 전류(tunneling current)를 얻기 위해서는 시료가 도체이어야 한다. 하지만, 전기저항을 측정하기 위해서는 탄소나노튜브는 절연층 위에 존재하여야 한다. 즉 다시 말해서 우리가 측정하고 싶은 물체에는 터널링 전류를 유도할 전압을 가해 줄 수 없고 따라서 탐침을 안전하게 접촉할 수 없게 된다.

대신 전자현미경의 전자빔을 이용하면 이 문제를 의외로 간단히 해결할 수 있다. 우선 탐침들은 측정하고자 하는 시료

REFERENCES

- [2] T.-H. Kim *et al.*, Nanotechnology **19**, 485201 (2008).

Fig. 3. Measured resistance as a function of probe spacing. Each colored line (left) and square (right) represents given probe spacing as shown in the superimposed SEM image (top).

표면 가까이 ($1\ \mu\text{m}$ 이하) 접근시킨 후 시료의 모양을 따라 탐침들을 정렬한다. 그런 뒤에 시료의 한 쪽 끝에 전자현미경의 전자빔을 고정시킨 후 탐침 하나를 천천히 시료 쪽으로 접근시킨다. 탐침과 시료의 접촉이 이루어지면 전자현미경에서 방출하는 전자빔에 의한 전류를 탐침에 연결된 전류증폭기를 통해서 확인할 수 있다. 그리고 나서 전류증폭기를 대신 전압을 접촉한 탐침에 가해 주고 나머지 탐침들은 터널링 전류가 느껴지는 순간까지 시료 쪽으로 접근시킨다. 마지막으로 터널링 전류를 일정하게 유지시키는 피드백 회로(feedback circuit)를 멈추고 각 탐침의 위치를 조정하여 나머지 접촉을 완성한다. 이런 방법으로 접촉을 완성한 뒤에 각 탐침의 연결을 바꾸어서 정전류전원(Keithley 2400)과 전압계(Keithley 6430)에 연결해서 전기저항 측정을 한다. 그림 3처럼 일정한 전류를 흘려서 얻은 전압강하의 선형 최소 제곱법(linear least square method)을 통해서 얻은 저항과 각 측정 탐침 거리를 이용해서 최종적인 일차원 전기전도도를 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 일차원 전기전도도와 물질의 단면적을 이용해서 물질의 전기전도도를 정밀하게 측정할 수 있다.^[2]

난알경계의 전기저항

최근 작아지는 반도체 칩의 크기로 내부의 전선의 크기도 기하급수적으로 작아지고 있다. 작아지는 전선의 폭은 결국 저항의 증가로 또한 칩의 온도와 소비전력의 상승을 이어진다. 이런 증가를 좀 더 자세히 살펴보면 단순히 선폭에 반비례하

Fig. 4. (a) SEM image and inverse pole figure map of three copper nanowires with four trenches. Inset shows crystalline orientation in inverse pole figure map. (b) Measured resistance as a function of probe spacing. Abrupt jumps in resistance occurs at high-angle random grain boundaries as indicated by arrows. Insets show grain boundary resistances after subtracting grain contributions.

지 않고 특정 선폭 이하에서 급격하게 증가됨을 관찰할 수 있다. 이런 급격한 증가의 원인을 밝힌다면 인류의 당면과제인 에너지 문제를 해결하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

기존의 연구결과를 살펴보면 대부분 고정된 전극을 이용해서 전자 산란의 주요 원인인 난알경계(grain boundary)와 표면산란(surface scattering)의 상대적인 중요도에 대한 연구가 대부분이다. 이런 비교만으로는 각기 다른 시료에 대해 일치된 결과를 얻기가 어렵고 비저항이 다른 난알경계가 공존하고 있을 때는 해석의 어려움이 있다.

최근 이런 문제점을 해결하고자 하는 시도가 있었고 four-probe STM을 이용하여 하나의 난알경계의 저항을 성공적으로 측정하는 데 성공했다.^[3] 하지만 난알경계의 구조와 연결시키지 못해서 반쪽짜리 결과에 그쳤다. 그 후, 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 전자 후방 산란 회절(electron backscattered dif-

REFERENCES

- [3] Y. Kitaoka *et al.*, Appl. Phys. Lett. **95**, 052110 (2009).

fraction)을 이용하여 금속선 내부의 난알 결정구조를 알아내고 그렇게 알아낸 결정구조를 이용해서 각 난알경계의 구조를 밝혔다. 또한 four-probe STM을 이용하여 특정난알경계에서 나머지 난알경계보다 백 배 정도의 큰 저항이 나옴을 관찰하였다(그림 4(b)).^[4] 저항이 큰 난알경계를 저항이 작은 난알경계로 바꾸는 방법을 찾는다면 같은 선향, 같은 물질의 경우에도 전체 저항을 획기적으로 줄일 수 있게 될 것이다.

비균일성과 저항

우리는 새로운 물질을 만들 때 가능하면 순수한 상태를 만들고자 한다. 물질의 성질을 측정하는 여러 가지 방법들이 일종의 공간적인 평균값을 측정하기 때문에 국소적으로 다른 물질(불순물) 혹은 다른 상(phase)이 있다면 만들고자 했던 그 물질의 성질이 아닌 다른 물질과의 평균적인 성질을 관측하게 되고 경우에 따라서는 새로운 성질을 찾지 못하는 경우도 생길 수도 있다.

반대로 균일한 상을 가지지 못한 시료일지라도 four-probe STM을 이용하면 국소적으로 균일한 부분에서 덩어리(bulk)와는 다른 특성을 확인할 수 있다. 또한 어떤 화학성분이 그 특성에 어떻게 영향을 주는지도 확인할 수 있기 때문에 추후 덩어리 상태의 시료를 만드는 데에도 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

먼저 살펴볼 시료는 최근 발견되어 많은 관심을 받고 있는 새로운 고온 초전도체 철-비소 화합물(iron pnictide)이다. 바륨-철-비소 화합물(BaFe_2As_2) 상태에 코발트(Co)를 철(Fe) 대신 바꾸어 주면 22 K 이하에서 초전도체가 된다. 이런 변화는 첨가되는 코발트의 양과 밀접한 연관이 있다. 기존의 연구는 코발트의 양을 달리하는 덩어리 결정을 만들어서 그 성질을 밝히고자 했다. 하지만 단결정 상태의 균일한 도핑(doping)은 쉬운 일이 아니다. 이런 어려움은 four-probe STM을 이용하면 상당 부분 해소가능하다. 그림 5처럼 각 위치별로 전압-전류 상관관계를 얻고 또한 오제전자(Auger electron)를 측정하여 표면의 화학성분을 공간적으로 얻어서 전압-전류 곡선과 일대일 비교를 함으로써 코발트 성분비가 얼마일 때 초전도성을 잘 나타내는지 확인할 수 있다.^[5]

사실 이런 초전도체의 연구는 기존의 주사터널링분광학(scanning tunneling spectroscopy, STS)을 통해서 많은 연구가 되어 왔다. 하지만 기존의 STS 방법은 보다 작은 영역에서 원자단위의 결합이나 불순물의 효과에 집중했다면 이 글에서 소개한 것은 좀 더 직접적인 방법을 통해서 기존의 STS에서 확인할 수 없었던 초전도 임계 전류(superconducting critical current)와 도핑 사이의 관계를 잘 보여주었다는 데

Fig. 5. (a) Resistance as a function of sample temperature showing superconducting transition. Inset shows SEM images showing cleaved sample surface. Measurement locations are indicated by circles and squares. Scale bars: 10 μm (white) and 250 μm (black). (b) Resistances measured at fixed temperature just below bulk transition temperature. Inset shows an SEM showing measurement locations indicated by the broken line.

그 의미가 있겠다.^[5]

또한 물질이 미시적인 상전이(microscopic phase transition)를 가지는 경우에도 four-probe STM은 좋은 도구일 수 있다. 스트론튬-루테튬 산화물($\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$)에 루테튬(Ru)을 망간(Mn)으로 치환을 하면 저온에서 금속-절연체 전이를 보인다고 알려져 있다.^[6] 이 경우 단결정 덩어리 시료를 이용한 일

REFERENCES

- [4] T.-H. Kim *et al.*, Nano Lett. **10**, 3096 (2010).
- [5] T.-H. Kim *et al.*, Phys. Rev. B **80**, 214518 (2009).

Fig. 6. I-V curves measured at different domains (80 K). Inset shows an SEM image showing domain contrast. Scale bar: 1 μm .

반적인 비저항 측정 시에는 특이한 점이 관찰되지 않았지만, 그림 6처럼 저온에서 전자현미경으로 관찰하면 미세적인 상분리(phase separation)를 보이는 독특한 점이 있다. 즉 도체인 부분과 절연체인 상이 나누어 금속-절연체 전이 온도보다 낮은 온도구간에 공존하게 된다.

이런 미세적인 상분리가 거시적인 측정에서는 관찰이 되지 않고 평균적인 도체부분의 비율에 의한 완만한 비저항의 변화만이 관찰된다. 따라서 이런 상분리가 일어나는 물질의 경우엔 일반적 비저항 방법으로는 그 물질의 특성을 제대로 밝혀낼 수가 없다. 각각의 미세적인 상의 전기저항 특성을 측정할 수 있어야 하는데 four-probe STM이 그 역할을 수행할 수 있다. 그림 6의 전자현미경 사진에서 검은 부분이 실제로 더 부도체

인 부분인데 그 부분과 밝은 부분의 저항을 비교해 보면 5배 정도 차이가 난다. 두 영역의 저항 차이는 시료의 온도가 낮아질수록 기하급수적으로 커짐을 확인할 수 있었다.^[7]

나오는 글

지금까지 우리는 몇 가지 실험결과를 통해서 four-probe STM이 보여줄 수 있는 가능성을 엿보았다. 미세적인 정밀한 저항의 측정으로 보다 직접적인 실험이 가능하고 구조, 화학구성 등과의 일대일 비교를 통해서 다양한 시료 묶음으로만 가능했던 체계적인 실험을 상대적으로 작은 수의 시료들로 가능할 수 있게 되었다. 비단 이런 예들만이 아니라 시료에 전류를 흘리고 그 표면의 전위차를 나노미터 분해능으로 측정도 가능하다.^[8]

기존의 four-probe 측정을 나노세계로 연결시켜주는 다리의 역할뿐만 아니라 원자적 분해능을 가진 STM/STS도 구현할 수 있는 four-probe STM의 다재다능함에 남다른 희망을 걸어 보며 이 글을 마무리하고자 한다.

REFERENCES

- [6] S.-I. Ikeda *et al.*, Phys. Rev. B **62**, R6089 (2000).
- [7] T.-H. Kim *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. **107**, 5272 (2010).
- [8] T. Druga *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 083704 (2010)