

ON-OFF 원자 스위치

한 병 성

(전북대 공대 전기공학과 부교수)

1. 서 론

최근 개개 원자들의 움직임을 조절할 수 있는 scanning tunnelling microscope (STM)의 [1] 유용성을 입증할만한 가공할 발명은 원자 한개로 ON-OFF 상태를 구현 할 수 있는 원자 스위치의 [2] 발명이라 할 수 있다. 이 원자 스위치는 원자를 조정하는 STM의 scanning용 침으로부터 원자 하나를 니켈 기판위에 전달 할 수 있게 함으로써 가능하게 되었다 [3]. STM의 Xenon 침과 기판 사이를 Xenon 원자 하나가 이동함으로써 스위치 작용이 이루어 지는데 [4, 5], 이 스위치 작용이란 높은 전도 상태의 침으로부터 낮은 전도 상태의 기판으로 원자가 이동함으로써 침과 기판 사이에 이루어지는 전기적 전도 현상을 [6] 말한다. 이러한 전기적 전도 상태는 마이크로 회로에서 중추적인 역할을 수행하는 ON-OFF의 2진 소자나, 스위치 소자로서 사용할 수가 있다 [3~7].

새로운 atomic scale의 [8] electronic device에 사용될 원자 스위치의 모델로써 STM의 침과 니켈 사이에서 Xenon 원자 하나가 움직이는 모습을 그림 1에 [4] 나타내었다. 이처럼 원자 하나의 움직임으로 ON-OFF 스위치 작용을 가능하게 할 수 있는 방법은 고압을 WSe_2 [9] 또는 MoS [10]에 걸어주어 selenium이나 sulphur 원자를 이동시키는 등의 여러 가지 방법들이 사용 가능하리라 예상되어진다.

컴퓨터 또는 전자제품 산업에서 IC의 사용으로 크

기가 작아진 지금의 마이크로 일렉트로닉 소자 보다도 크기가 더욱 더 작고 스위치 속도가 빠른 원자 스위치를 내장한 IC 칩의 개발 가능성을 열어준 STM은 과연 어떤 것인가 살펴볼 필요가 있으리라 생각된다. STM은 atomic resolution을 갖고 물질

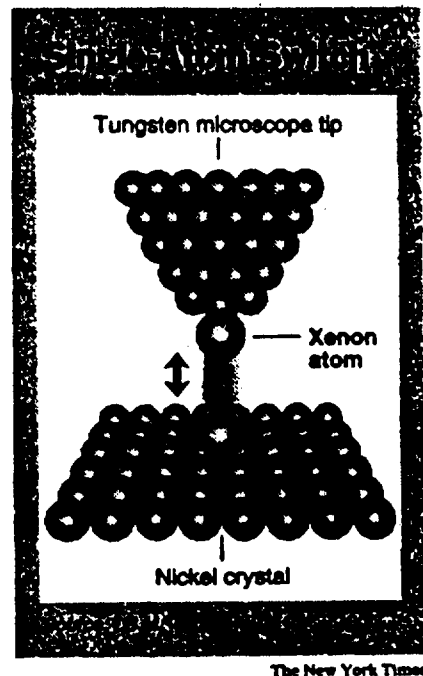


그림 1. Xenon 원자 하나의 움직임 (simple atom switch)

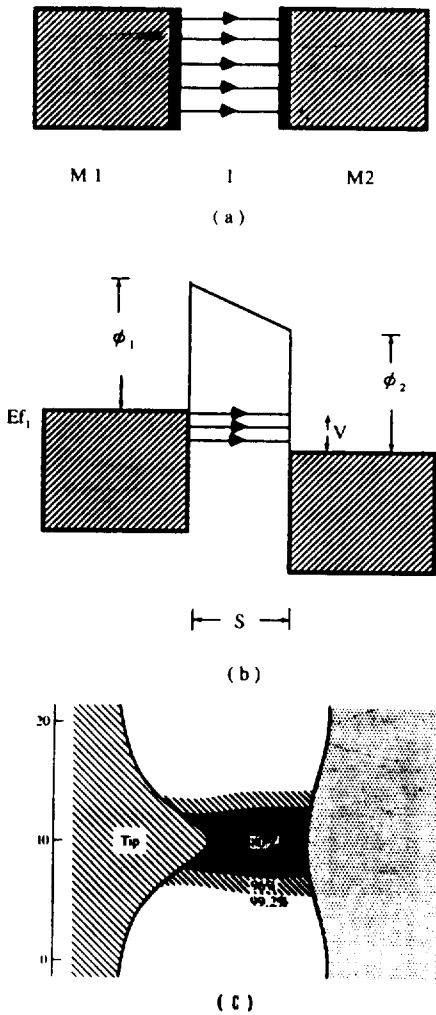


그림 2. a) metal-Insulator-Metal junction. The current density(indicated by arrows) is uniform.
 b). Energy diagram for tunneling junction having a trapezoidal barrier (ϕ_1 , ϕ_2) of thicknees S.
 c) Calculated current density distribution for tunneling from a tip to a corrugated surface, assuming an effective barrier height of 2.41 eV, a tip radius of 1.7 Å and $s=4$ Å (after 1)

표면의 매우 섬세한 이미지를 나타낼 수 있으며[11] 예리한 침의 추적을 통해 물질표면의 상태를 원자적

레벨에서 나타낼 수 있는데 이 STM의 가장 기본이 되는 물리 이론은 전자의 tunnelling현상이다[12].

전자의 tunnelling현상이란 매우 얇은 절연층 양면에 두개의 도체를 두고 이 두전도층에 전압을 걸어주면 전자의 wave function의 중첩에 의하여 두 전도체 사이에 전류가 흐르는 현상이다. 가장 일반적인 tunnelling junction으로는 도체-절연체-도체판을 샌드위치 형태(그림 2a)로 만든것으로 현재 많이 사용되어 지고 있으며 특히 초전도체에서는 이 현상을 이용한 SQUID라는 측정용 센서를 개발하여 우주, 해양탐사, 의학분야에서 이용되고 있다.

역사적으로 볼때 전자의 이러한 tunneling현상이 최초로 제시된 것은 1920년대 경으로[14,15], 이때는 진공벽을 사이에둔 결합에서 고려되었다. 이후 진공벽이 제거되고[16] 지금과 같이 고체 벽을 사이에둔 tunneling현상을 실험적으로 성공시키게 된것은 30년 후 전도이다[17,18]. 당시는 진공벽에 의한 tunneling현상을 STM동작에 이용할 만큼 충분한 연구가 이루어지지 못하다가 산화물 고체장벽이 없는 상태에서 tunneling spectroscopy를 만들 수 있는 최초의 가능성이 Young등에[19] 의하여 시사되었다.

2. STM의 기초이론과 동작모드

물리적 개념에서 전위장벽이라하는 매우 얇은 절연층을 사이에 둔 두개의 도전층의 전극사이에서 tunneling이 발생한다. 그림 2. (b)의 경우 전극 M_1 의 E_{f1} 과 $E_{f1}-V$ 상태로 부터 전극 M_2 의 E_{f2} 과 $E_{f2}+V$ 의 전자가 점유되어 있지 않은 상태로 전자 tunneling이 일어난다. 이때 transfer-Hamiltonian [21] 접근법에 의하면, 분리된 갭(즉 끼어넣어 있는 절연체)에서 두 전극의 wave function의 중첩에 의하여 tunneling전류 I 가 흐른다. 그러므로 tunneling전류 I 는 두 전극의 거리 및 전극 물질의 전자 상태와 함수 관계가 있게 된다. 두 전극 사이의 전압 V 에 의하여 평균 장벽을 통과하는 자유 전자의 tunneling에 따른 전류밀도 J 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[22].

$$J = (e^2/n) * (k_0/4\pi^2s), V.exp(-2k_0s) \dots\dots(1)$$

s : 유효 tunneling거리(Å)

k_0 : 전극 표면방향으로의 wave-function density의 감소 거리의 역수

V : 인가전압 [V]

$$(e^2/n) = 2.44 * 10^{-4} \Omega^{-1}$$

ϕ : 유효장벽 높이 : 두 전극 사이에 진공벽의 유효 장벽높이로 대략 두 물질의 일 함수의 평균값으로 수 eV 정도이다.

식 (1)에서 보듯 전류 I는 침과 표면사이의 유효 거리와 장벽 높이의 지수 함수이며 유효 장벽높이와 V는 함수 관계가 있다. 이들 tunneling 전류는 tunneling 거리에 가장 민감하게 동작하며 이것이 STM 동작의 기초를 이루게 된다. 만약 전극 하나가 STM의 침이라면, tunneling 전류는 침의 정점과 시료 표면(관찰하고자 하는 시료) 사이에 형성되는 filament로 한정되어지게 되는데, 가장 합리적인 filament의 크기는 침의 point 크기에 비하여 매우 작아야 한다. STM에서는 침과 물질 사이의 전위 방벽으로 진공, gas, 또는 액체등을 사용하므로써 tunneling current filament가 물질의 표면을 가로질러 움직이면서 자유롭게 scanning을 할 수 있게 한다.

STM의 침이 물질 표면위를 매우 좁은 간격을 두고 이동하면 침과 물질 사이에 tunneling 전류가 발생하며 물질 표면의 구조에 따라 전류는 변화하고 이 변화로 물질의 표면분석이 가능하다. 즉 물질의 표면을 현미경의 침이 움직이면서 물질 표면의 원자 평원에서 원자들에 의하여 구성된 굴곡의 형태에 따라 자동적으로 상하 운동을 하면서 표면상태를 원자 레벨에서 기록해 준다. 침이 시료 표면의 적정위치에 있게 하기 위하여 그림 3, a[12]와 같이 piezoelectric 삼각대를 사용한다. piezoelectric 삼각대 (XYZ)에 붙어 있는 microscope 침(T)이 시료 표면(S)위를 scanning하고, rough positioner L는 시료를 삼각침이 닿을 수 있을 정도의 범위 안으로 시료를 옮겨준다. 충격 필터 시스템 P는 외부 충격으로부터 기기를 보호해 준다. 제어장치 Cu로부터 조작된 전압 V_z 가 piezoelectric 소자 z에 인가되고 전압 V_x 와 V_y 에 의하여 침의 위치가 바뀌어 지면서 시료 표면위를 scanning한다. 한편 침의 y방향 scanning은 시료 표면의 형태에 따라서 상하로 움직이게 된다.

STM의 침은 원자가 시료 표면에 결속되어 있는 상태에서 시료 표면으로부터 원자를 떼어낼 수도 있고, 표면에서 원자 하나를 떼어내는 힘보다 작은 힘

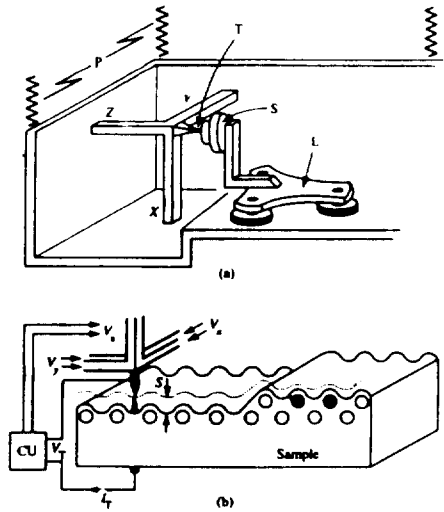


그림 3. Schematic of a scanning tunneling microscope and its operation.

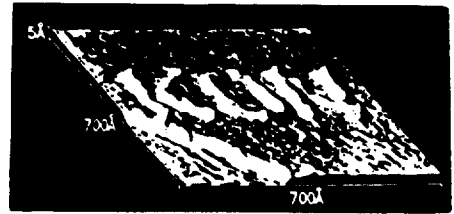


그림 4. STM을 이용하여 Si기판위에 50Å의 폭으로 쓴 글씨.

으로 물질 표면을 따라 원자를 이동시킬 수도 있다. 이렇게 하므로써 STM을 이용한 atomic scale의 표면 modification도 가능하다. 이러한 STM은 IBM 연구소의 Gerd Binnig과 Heinrich Rohrer박사에 의하여 발명되었으며 이 발명으로 1986년 노벨 물리학상을 수상한 바 있다. 그림 4는 Si는 기판위에 STM의 침으로부터 원자를 이동시켜 폭 50Å으로 쓴 글씨의 사진이다.

3. 원자 스위치의 전망

이들 STM에 사용된 방법을 이용한 원자 스위치 제작은 시작 단계로써 이들 실험이 극 진공(UHV)과 저온(4K)의 상태에서 이루어져야 하는 문제점이 있다. 특히 atomic scale의 전자 부품의 딜레마는 스

피드의 한계성등 극복해야 할 많은 문제점이 있다. 현재 사용되고 있는 한 bit의 정보는 약 100개의 전자들로 구성되어 있는데, 만약 미국 국회 도서관에 소장되어 있는 자료를 디스크에 기억시키기 위해서는 200tertabits의 기억 용량이 필요하며 1초에 10^7 개의 비율로 원자를 만들어 낸다해도 이 도서관 자료를 다 기억시키는데 230일 정도가 필요하게 된다. 그러나 만일 이러한 속도문제가 해결된다면 현재 사용되고 있는 12inch크기의 디스크 한장에 저장이가 능할 정도로 scale면에서의 축소를 가져오는 이점이 있다. 원자 scale의 12inch디스크 한장의 용량은 현재 사용되고 있는 디스크 250,000장에 해당되는 분량이니 그 기대되는 효과는 엄청나리라 예상 할 수 있다. 위에서 지적한 몇가지 문제점들이 극복되어 이들 원자 스위치가 전자 소자(특히 atomic scale논리회로)에 이용된다면 70년대 초부터 시작된 micro scale의 시대는 끝나고 nano scale의 nanoscience 또는 nanotechnology정보의 시대가 열리리라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] P. K. Hansma and J. Tersoff, J. appl. phys. 61 (1987)R1~R23.
- [2] D. M. Eigler, C. P. Lutz and W. E. Rudge, "An atomic switch realized with the scanning tunneling microscope" Nature, vol. 352, 15, Aug. (1991) 600.
- [3] R. S. Becker, J. A. Golovchenko and B. S. Swartzentruber, Nature, 325(1987)419~421.
- [4] M. W. Browne, The New York Times, Thursday, Aug. 15, 1991.
- [5] D. M. Eigler and E. K. Schweizer, Nature 344(1990) 524~526.
- [6] L. Hooper, The Wall Street Journal, Thursday Aug. 15, 1991.
- [7] 한병성, 전북대 신문, 1991년, 10월 28일자.
- [8] R. Landauer, Physica A168(1991) 75~87.
- [9] H. Fuchs and T. Schimmel, Adv. Mater. 3(1991) 112~113.
- [10] The Economist 82(Feb. 2, 1991).
- [11] G. Binning and H. Rohrer, "scanning tunneling microscopy" Helv. phys. Acta. 55(1982)126.
- [12] G. Binning and H. Rohrer, "scanning tunneling microscopy", IBM J. Res. Develop. vol. 30, No. 4(1986)355~369.
- [13] 한병성, "세라믹 계통의 고온 초전도체", 전자공학회지, 제16권 제2호 (1989) 113~116.
- [14] R. H. Fowler and L. Nordheim, "Electron Emission in Intense Electric Fields". Proc. Roy. Lond. A119, 173(1928);
- [15] J. Frenkel, "On the Electrical Resistance of Contacts Between Solid Conductors". Phys. Rev. 36(1930)1640.
- [16] I. Giaever, "Electron Tunneling and Superconductivity," Rev. Mod. Phys. 46(1974)245.
- [17] L. Esaki, "New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions," Phys. Rev. 109(1958)603.
- [18] I. Giaever, "Energy Gap in Superconductors Measured by Electron Tunneling," Phys. Rev. Lett. 5(1960)147.
- [19] R. Young, J. Ward and F. Scire, "The Topograpiner", Rev. sci. Instrum. 43(1972)999.
- [20] E. Stoll, A. Baratoff, A. Selloni and P. Carnevali, "Current Distribution in the Scanning Vacuum Tunneling Microscope: A Free Electron Model," J. Phys. C17(1984)3073.
- [21] J. Bardeen, "Tunneling from a Many-Particle Point of View," Phys. Rev. Lett. 6(1961)57.
- [22] J. Simmons, "Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect Between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film," J. Appl. Phys. 34(1963)1793.



한병성(韓秉誠)

1951년 12월 22일생. 1975년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동대학원 졸업. 1984년 충남대 대학원 졸업. 1988년 Univ. of Louis Pasteur 졸업(공박). 1989년 CNRS(국립과학연구소) 연구원. 1991년 IBM T.J. Watson Research Center 객원 연구원. 현재 전북대 공대 전기공학과 부교수.