

반도체-반도체 사이의 거리 변화에 따른 전압-전류 특성 연구

김혜정, 김정호*, 천민우**, 박용필**

(주) 프로텍 광부품기술연구소, *한국광기술원, **동신대학교

A Study on V-I characteristics depend on a distance between semiconductor-semiconductor

Hye-Jeong Kim

PRO-TECH Co., Ltd., *KOPTI, **Dongshin Univ.

Abstract

The movement of electron in the semiconductor-gap-semiconductor was observed by the variation of V-I characteristic as a distance two ZnO(1010) single crystals. When the resistance between two crystals was $10^2 \sim 10^4 \Omega$, V-I characteristics had the pattern of the field emission or ohmic contact. On the other hand, when the resistance was larger than $10^7 \Omega$ by increasing the distance between two crystals, the effect of surface barrier was prominent. This result leads to the conclusion that both the field emission (or ohmic contact) and the surface barrier effect including the tunneling have the influence on V-I characteristics of mechanically contacted crystals.

Key Words : ZnO(1010), surface barrier, ohmic contact

1. 서론

반도체 중 산화물 반도체인 산화아연에 대한 전기적 특성과 표면 구조 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 반도체 표면의 터널링 전자의 측정법은 매우 민감하고 분해능이 좋아 고체 표면 연구에 널리 이용되고 있다. 두 고체 사이에 장벽이 존재할 경우 터널링 전자는 두 가지 경로를 갖는다. 에너지 손실 없이 장벽을 통과하는 탄성 터널링과 장벽에 존재하는 분자중 또는 흡착종에 에너지를 전달하는 비탄성 터널링이 있다. 후자의 경우는 터널링 tunnelling spectroscopy (IETS)이다. IETS는 표면 흡착제의 진동 모드 연구에 매우 유

용하다. Lambe와 Jaklevic은 금속-절연체-금속의 얇은 필름 터널 구조에서 터널링 전자와 분자 진동사이의 메카니즘에 대한 연구를 보고하였다[3] Klein과 Leger 등은 Mg-MgO-Au 구조에서 전체 구조의 비탄성 터널링을 보고하였다[4].

금속-산화물-금속의 샌드위치 구조에 외부전압을 걸어주면 탄성 터널 전자가 흐르게 된다. 만약 산화물위에 $\hbar\omega$ 에너지에 해당하는 진동 모드를 갖는 흡착종이 존재하게 되면 최소전압 V_{min} 이상에서 비탄성 과정이 일어날 수 있다.

$$eV_{min} = \eta\omega \quad \dots\dots (1)$$

탄성 과정처럼 비탄성 전자는 외부전압에 대해 선형으로 나타날 것이다. 그러나 비탄성 전자는 샌드위치 구조의 전체 전도도의 0.001 변화에 해당하기 때문에 탄성 과정에 묻혀서 확인하기가 어렵다. 따라서 전압-전류 특성을 일차 또는 이차 미분하여 그 변화를 관찰한다. 터널링 전자와 흡착중간의 상호작용에 대한 성질은 Harrison matrix element 가 적용된다[5].

$$|M_{12}| \propto \exp \left\{ - \int_0^d dz \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{1/2} [U(z) + U_{int}(z) - (E - E_L)]^{1/2} \right\} \dots (2)$$

E는 전체 전자에너지이고 E_L은 장벽에 평행한 운동성분에 해당하는 운동 에너지이다. d는 금속과 금속사이의 거리이고, 장벽의 상태는 U(z)로 나타나며 z는 한 면으로부터의 거리이고 U_{int}(z)는 전자와 흡착제의 쌍극자 모멘트간의 상호작용을 나타낸다. 장벽에 수직인 P_z 성분을 갖는 영구 쌍극자 모멘트를 갖는 종의 경우 상호작용 U_{int}(z)는

$$U_{int}(z) = \frac{2eP_z z}{(z^2 + r_L^2)^{3/2}} \dots (3)$$

가 된다. 흡착제가 영구적인 쌍극자를 갖지 않는다면 터널링에 의해 분극이 생기게 되고 U_{int}(z)는

$$U_{int}(z) = - \frac{4e^2 \alpha z^2}{(z^2 + r_L^2)^3} \dots (4)$$

로 된다. 이러한 상호작용으로 영구적인 쌍극자 모드의 세기를 예측하면

$$\frac{d^2 I}{dV^2} \propto \langle m | p_z | 0 \rangle^2 \dots (5)$$

이고 $\langle m | p_z | 0 \rangle$ 은 각각의 진동자의 쌍극자 세기를 나타낸다. 유도 쌍극자 모드의 세기를 예측하면

$$\frac{d^2 I}{dV^2} \propto \langle m | \alpha_{zz} | 0 \rangle^2 \dots (6)$$

가 된다. 여기서 a는 분극 텐서 요소이고, $\langle m | \alpha | 0 \rangle$ 은 분극(polarizability)성분의 매트릭스 요소이다. 두 모드의 세기는 터널링 방향에 대한 쌍극자의 배향에 의존한다. 그러므로 스펙트럼의 세기로부터 흡착제의 배향을 결정할 수 있다[3]. 알루미늄 산화물과 마그네슘 산화물에서 포름산의 터널링 전자의 스펙트럼 연구가 보고 되어있다[6,7]. 본 연구에서는 먼저 두 산화아연의 접촉사이의 거리를 조절하면서 전압-전류 특성 변화를 관찰하여 미세 거리 조절 동안 터널링 특성이 나타나는지를 보고, 만약 산화아연의 접촉면 사이에 흡착종이 존재할 경우에 터널링 전자의 비탄성 충돌이 일어나는지를 확인하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

시료는 Atomergeric Chemetals Co.로부터 구입한 4×4×1 mm³ 크기의 nonpolar (10 I 0)면을 갖는 산화아연 단결정으로 실험에 사용된 면은 1μm diamond paste로 연마한 다음 XRD와 SEM 분석으로 표면상태를 확인하였다. 전기전도도 측정을 위해 시료의 한쪽 면은 금을 진공 증착시킨 후 금으로 틀을 만들어 연마한 면과 두 측면을 제외한 나머지 면을 고정하였다. 이처럼 처리된 시료 두 개를 준비하여 연마한 면을 마주보도록 시료 지지대에 고정된 다음 quartz판에 장착하여 가스관이 연결된 진공 시스템에 연결하였다 (그림 1).

진공시스템의 기본 압력은 1×10⁻⁷ torr (1.33×10⁻⁵ Pa)로 유지되었다. 접촉거리에 따른 전자의 흐름의 변화를 관찰하기 위해 거친 접촉은 rotary feedthrough을 이용하였으며 접촉시켰고 8 μm이하의 미세한 접촉거리 조절은 piezosystem (P8/8NV, piezोजना사)을 사용하였다. 전압-전류 특성을 측정하기 전에 LRC meter (Kotronix사)를 사용하여 piezo 작동에 따른 시료 접촉면간의 거리를 확인하였다. 전압-전류 측정에서 시료에 걸어준 바이어스 전압은 0~1 V(12 bit DAC) 범위이고 시료로부터 나온 전류는 I-V 변환장치 (Keithley Co.)를 거쳐 전압으로 변화시킨 후 12 bit ADC를 통해 컴퓨터에서 읽어들이었다 (그림 2).

두 반도체 사이의 거리를 조절해가면서 산소 흡착전과 후에 대한 전압-전류 특성을 관찰하였

제 6 회 일렉트렛트 및 응용기술 연구회

다. 측정 시스템의 정확도와 data acquisition 프로그램의 검증을 위해 오차가 1 %인 1M, 10M, 100M 저항에 바이어스 전압 1V을 걸어주어 전압-전류 그래프를 얻었다.

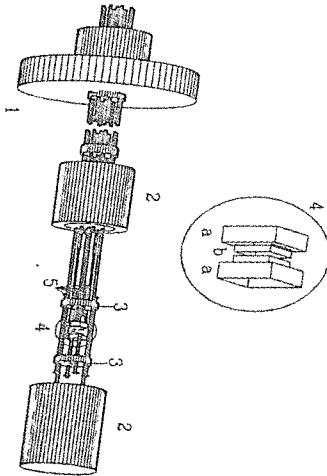


그림 1. A View of the sample assembly for oxidation reaction of carbon monoxide. (a) gold blocks, (b) ceramic spacers and (5) screws hold crystals (b). 1 and 2 are a feedthrough and heating elements, respectively

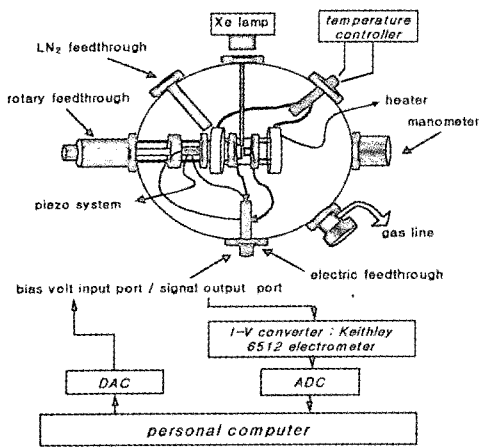


그림 2. Schematic diagram of experimental setup for measurement of V-I characteristics as a function of distance of ZnO(10 I 0)-ZnO(10 I 0) contact

그 결과 전압에 대한 얻어진 전류가 ohm의 법칙을 잘 따랐고 바이어스 전압이 0 V일 때 0.05 nA 정도의 초기전류를 보였다. 매 실험에서 나타난 초기전류는 기계적인 것으로 본 실험에서는 보정하지는 않았다. 전류의 잡음은 2.1 pA(표준 편차)정도였다.

3. 결과 및 고찰

일반적으로 금속-금속 시스템에서 둘 사이의 거리가 감소함에 따라 그들 사이의 전자전달방식은 전형적인 터널링 방식(conventional electron tunneling regime)에서 전자적 접촉 방식(electronic contact regime)과 역학적 접촉 방식(mechanical contact regime)으로 변화게 된다. 터널링 방식은 전압-전류 특성에서 다시 3가지 메카니즘으로 나눌 수 있다⁷⁰. 외부 바이어스전압이 금속과 금속 사이의 장벽 높이(Φ ; 금속의 경우 일함수)보다 작을 때($V \ll \Phi/e$)는 터널링에 속하고 이때 흐르는 전류는 외부 바이어스 전압에 비례하게 된다($I \propto V$). 바이어스 전압이 장벽 높이보다 클 경우에는 $I \propto V^2 \exp(-const/V)$ 관계식을 따르고, 포텐셜 장벽이 낮고 바이어스 전압이 $kT(298K$ 에서 $0.025 eV$)보다 매우 클 경우에는 I 는 $\exp(const/V^{1/2})$ 에 비례하게 된다. 두 금속 사이의 거리가 100 nm 정도이면 전장 방출(field emission) 현상이 두드러지고 0.5-1 nm사이의 거리일 경우는 전자 터널링 과정이 우세하게 나타난다. 두 금속사이의 거리가 어떤 특정거리 이하로 감소하게 되면 그들 사이의 포텐셜 장벽이 점차적으로 낮아지게 되어 양자역학적 점 접촉이 시작된다. 이러한 영역에서는 어떤 장벽도 존재하지 않는 전자전달이 일어난다. 좀 더 거리가 작아지면 전압-전류가 선형으로 나타나는 ohmic 전도도가 관찰된다. 본 연구에서 사용하는 반도체-반도체 시스템에서는 앞에서 언급한 것처럼 표면 전하 개념 등이 포함되어지므로 금속-금속 계에서 관찰된 현상보다 좀더 복잡해진다. 본 실험에서는 두 반도체-반도체 사이의 거리를 변화시킬 때 나타나는 전압-전류 특성을 관찰하고자 한다.

흡착전후의 결정면간의 거리를 3 mm 정도로 조절한 후 673K, 1×10^{-7} torr에서 30분간 전처리 하였다. 두 결정면간의 거리를 rotary feedthrough

와 piezo translator로 조절하였으나 거리의 절대값을 알 수 없으므로 1 V의 바이어스 전압을 걸어줄 때 흐르는 전류를 측정하여 R_g (결정간 저항)를 얻고 흡착전후에 비슷한 R_g 값을 갖은 전압-전류 특성을 비교하였다. 일반적으로 두 결정면간의 거리가 멀어지면 R_g 값이 커진다.

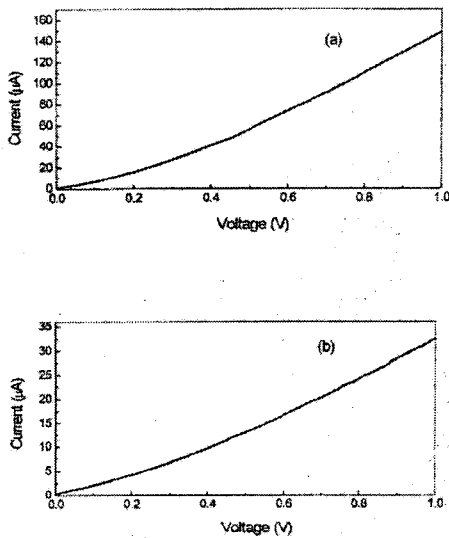


그림 3. I vs. V plots of ZnO(10 $\bar{1}$ 0) - ZnO(10 $\bar{1}$ 0) having a gap distance, $R_g \approx 10^4 \Omega$ region at 298K. The sample assembly was degassed at 673K for 10 min(a) and exposed to 5 torr(667 Pa) oxygen for 10 min(b). ($R_g = 1$ V bias/ current)

그림 3(a),(b)와 4(a),(b)는 전처리 된 시료와 298K에서 5 torr(667 Pa) 산소를 접촉시켰을 때 얻은 전압-전류 특성을 비교한 것이다. R_g 값이 $10^2 \sim 10^4 \Omega$ 영역일 때는 두 경우 모두 전장 방출 형태의 전압-전류 특성을 보이며 미세한 형태는 관찰되지 않았다. 그러나 R_g 값이 $10^7 \Omega$ 보다 커지면 전처리된 시료에서는 0.05 V에서 전류의 급격한 증가가 보였고 산소와 접촉된 경우는 0.6~0.7 V에서 전류가 급격히 증가하였다. 산소와의 접촉 시간이 길어지면 급격한 전류를 보인 바이어스 전압이 높아지는 경향이 관찰되었으며 그 외의 다른 미세한 형태변화는 볼 수 없었다. R_g 값이 $10^9 \Omega$ 범위가 되면 두 결정사이가 충분히 멀어져 전류의 불연속적인 흐름이 관찰되지 않았다. 이러한 결정

면간의 거리 변화로 얻어진 특성들은 접촉시 얻어진 특성에서 선형인 성분 즉 ohmic 접촉과 field emission 성분을 제거한 (I-kV vs. V) 것이 주로 터널링 특성임을 시사해 준다.

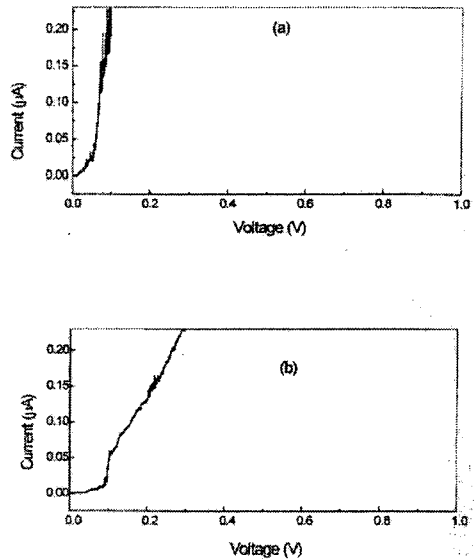


그림 4. I vs. V plots of ZnO(10 $\bar{1}$ 0) - ZnO(10 $\bar{1}$ 0) having a gap distance, $R_g \approx 10^7 \Omega$ region at 298K. The sample assembly was degassed at 673K for 10 min(a) and exposed to 5 torr(667 Pa) oxygen for 10 min(b). ($R_g = 1$ V bias/ current)

4. 결론

두 산화아연 결정면 사이의 거리에 따른 전압-전류의 특성 변화와 축전 용량을 측정하여 반도체-공간-반도체에서의 전자의 이동을 관찰하였다. 두 결정면 사이의 저항이 $10^2 \sim 10^4 \Omega$ 일 때는 거의 field emission 또는 ohmic contact 형태의 전압-전류 특성을 보였으나 반도체사이의 거리가 증가하여 둘 사이의 저항이 $10^7 \Omega$ 보다 커지면 표면 장벽의 효과가 두드러지게 나타났다. 이 결과로부터 기계적으로 접촉된 두 단결정 사이에는 field emission(또는 ohmic contact)과 터널링이 포함된 표면 장벽의 효과가 함께 영향을 준다고 결론지을 수 있다.

참고 문헌

- [1] Kokes, R. J., J. Phys. Chem., 89, 99, 1962.
- [2] Chon, H. and Pajares, J., J. Catal., 14, 257, 1969.
- [3] J. Lambe and R. C. Jaklevic, Phys. rev. 165, 821, 1968,
- [4] J. Klein and A. Leger and M. Belin and D. Defourneau and M. J. L. Sangster, Phys. rew. B, 7, 2336, 1973.
- [5] W.A. Harrison, Phys. Rev. 123, 85J, 1961.
- [6] N. M. D. Brown and R. B. Floyd and D. G. Walmsley, J. Chem. Soc. Faraday Trans. II, 75, 17, 1979.
- [7] C. S. Korman and J. C. Lau and A. M. Johnson and R. V. Coleman, Phys. Rev. B19, 994, 1979.