

## ZnO 나노선 FET에서의 접촉 에너지 장벽의 전기적 특성 연구

김강현, 임찬영, 김혜영, 김규태\*, 강해용\*\*, 이종수\*\*\*, 강원\*\*\*\*

고려대학교\*, 고려대 BK21 정보사업단\*\*, University of California, Davis\*\*\*, 이화여자대학교\*\*\*\*

### Electrical properties and contact energy barrier of ZnO nanowire field effect transistor

Kanghyun Kim, Chanyoung Yim, Hyeyoung Kim, Gue-Tak Kim\*, Haeyong Kang\*\*, Jongsu Lee\*\*\* and Woun Kang\*\*\*\*

Korea Univ.\*, Korea Univ. BK21 information Technology\*\*, University of California, Davis\*\*\*, Ewha Women's Univ.\*\*\*\*

#### Abstract

ZnO 단일 나노선 field effect transistor (FET) 소자의 2단자 전류-전압 특성을 조사해 보면 n-type 반도체 특성이 나타남을 알 수 있다. 그러나 2단자로 측정 할 경우 반도체 나노선과 금속 전극사이에 존재하는 접촉저항의 영향이 필연적으로 포함된다. 따라서 측정한 결과가 나노선에 의해서 나타나는 고유한 특성인지 접촉저항의 원인이 되는 에너지 장벽의 성질인지 명확히 밝힐 필요가 있다. 그래서 이번 연구에서는 4단자 측정방법을 이용하여 접촉저항 성분을 배제한 소자의 고유한 성질을 밝혀낼 뿐만 아니라, 이것을 2단자의 결과와 비교함으로써 접촉점에서 나타나는 에너지 장벽의 특징도 파악해 낼 수 있었다. 실험에서 사용된 ZnO FET 소자의 경우, 접촉점에서 생기는 에너지 장벽을 터널링을 통해 극복하는 것으로 분석되었고 이는 온도 변화에 따른 4단자 및 2단자 전류-전압 측정을 통해 확인될 수 있었다.

**Key Words** : ZnO 단일나노선 FET, 접촉저항, 4단자 측정, 에너지장벽, 터널링

#### 1. 서론

최근까지 많이 연구되어온 나노선은 탄소 나노튜브에서부터 기존의 실리콘 나노선, III-V족 반도체인 GaN와 II-VI족인 ZnO까지 다양하다. 이러한 나노선은 기존의 벌크 반도체에서 나타나는 특징뿐만 아니라 양자효과와 같은 여러 다른 특징들을 보여주고 있다. 그 중 ZnO 나노선은 약 3.37 eV의 큰 밴드갭을 가지고 있어 ultra violet(UV) 레이저와 light emitting diode, photodetector, chemical sensor에 이르기까지 그 활용분야가 다양하다. 그러나 현재 이러한 나노선을 실질적으로 활용하기 위해서는 해결해야할 문제가 많이 있다. 그 중 나노선과 금속 전극사이의 접촉 문제는 실용화를 위한 문제뿐만 아니라 나노선 자체의 특성 연구에서도 중요한 문제점이다. 이러한 나노선의 접촉저항 문제를 규명하기 위하여 본 연구에서는 단일 ZnO 나노선을 이용한 4단자 소자를 만들었다. 4단자 전극을 이용하여 접촉저항뿐만 아니라 field effect transistor (FET)와 같은 전기적 특성 또한 연구하였다.

#### 2. 실험 방법

이번 실험에 쓰인 ZnO 나노선은 일반적으로 많이 쓰이는 chemical vapor deposition (CVD) 방법으로 합성하였으며 단일 나노선 소자를 만들기 위하여 electron beam lithography 기술을 이용하였다. 우선 합성된 ZnO 나노선이 잘 분산된 용액을 기판에 뿌리고 나노선이 적당한 밀도로 기판에 가라앉아 붙을 때까지 기다린다. 기판에 붙은 나노선에 위치를 파악하기 위하여 AFM, SEM 등의 현미경으로 기판에 뿌려진 나노선을 관찰한다. 적당한 나노선을 선택해 원하는 소자의 디자인을 자체개발한 CAD프로그램

으로 설계한다. 이 CAD 파일을 바탕으로 electron beam lithography를 이용하여 단일 나노선에 소자 패턴을 전사하고 현상과 증착, lift-off 과정을 거쳐 소자를 완성하게 된다. 완성된 소자는 시료나 상황에 따라서 RTA나 에칭 과정을 거치게 된다.

완성된 소자의 전기적 특성을 측정하기 위하여 Au wire ball bonder를 이용해 소자와 소켓을 금선으로 연결한다. 이렇게 연결된 소자를 저온 장치에 넣고 HP4140B와 electrometer를 이용하여 전기적 특성을 측정하였다.

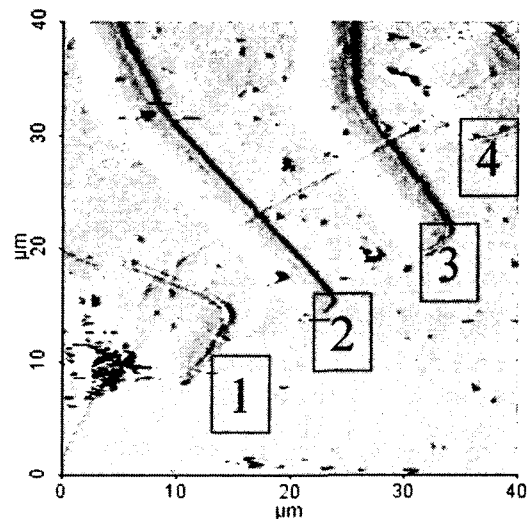


그림 1. 단일 ZnO 나노선 4단자 소자의 atomic force microscope (AFM) 이미지.

### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 이번 실험에서 측정된 ZnO 나노선의 noncontact AFM 이미지이다. 나노선의 두께는 약 25 nm 이고 각 전극사이의 거리는 전극1번과 2번 사이는 6.5  $\mu\text{m}$ , 2번과 3번 사이는 8.5  $\mu\text{m}$  이고 3번과 4번 사이는 4.4  $\mu\text{m}$  이다. 4개의 전극은 Ti와 Au를 각각 10 nm와 90 nm 로 증착하여 만들었다.

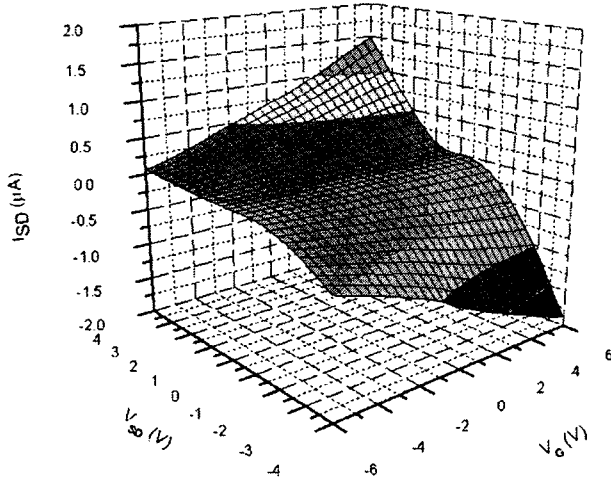


그림 2. ZnO 나노선의 FET 측정 결과.

그림 2는 그림 1의 전극 2번과 3번 사이의 FET 특성을 측정된 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 gate 전압에 따라서 전류 변화가 n-type의 반도체 특성을 잘 보여주고 있다. 그림 2의 결과를 이용하여 전하 이동도를 구해보면 10 ~ 30  $\text{Vs/cm}^2$  정도의 값을 보였는데 전하 이동도는 온도에 영향을 크게 받지 않았다. 같은 맥락에서 전도도 또한 온도에 크게 변하지 않는 것을 알 수 있었다. 소스와 드레인 전극 전압에 대해서는 약간 비대칭적인 모습을 보여 FET 특성 곡선 또한 전극 접촉 상태에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 이와 함께 다른 전극들 사이의 FET 특성들도 각각 다르게 나타났는데 특징적으로 전극에 따라서 gate 전압에 따른 전류가 포화 현상이 나타나기도 하였고 그렇지 않은 특성을 보이는 전극들도 있었다. 이러한 특성 또한 금속 전극과 나노선 접촉에서 비롯된 것으로 생각된다.

그림 3은 각각의 2단자와 4단자의 전압-전류 특성 곡선으로 2단자의 경우는 옴의 법칙을 따르지 않았으나 4단자의 경우는 옴의 법칙을 따르는 것을 알 수 있었다. 2단자와 4단자로부터 구한 저항의 차이는 수 십 배정도를 보였다. 그림 3의 삽입된 온도에 따른 저항 그래프에서도 볼 수 있듯이 그 차이는 작아지지 않았다. 따라서 2단자의 경우 접촉 저항이 소자의 전압-전류 특성을 결정짓는 것을 알 수 있었다. 이번에 측정된 ZnO 나노선의 전도도를 그림 3의 4단자 전압-전류 특성 결과에서 계산해보면 약 90  $\text{S/cm}$  로 상당히 높은 수준임을 알 수 있었다. 이와 같은 높은 전도도임에도 불구하고 그림 3의 2단자 전압-전

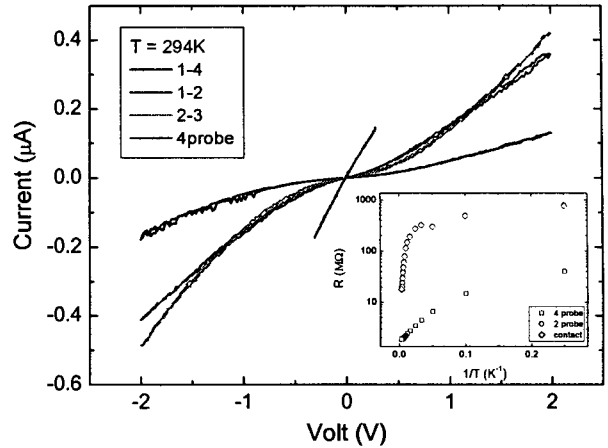


그림 3. ZnO 나노선의 4단자와 2단자의 전압-전류 특성.

류 곡선은 옴의 법칙을 따르지 않는 형태를 보였다. 이것으로 보아 나노선 자체의 전기적 특성과는 상관없이 금속 전극과 나노선 사이에 접촉 문제가 소자특성에 크게 작용하고 있다는 것을 알 수 있었다.

### 4. 결론

앞서 설명한 ZnO 단일 나노선 소자의 FET 특성 실험과 2단자와 4단자의 전기적 특성 측정에서 볼 수 있듯이 금속 전극과 나노선의 접촉 문제는 나노선 소자의 특성을 결정짓는 중요한 요인임을 확인할 수 있었다. 이러한 접촉 특성은 두 개의 다이오드가 나란히 역으로 연결된 모델과 비슷하다고 볼 수 있으나 실험결과와는 일치하지 않았다. 실험결과에서 접촉점에서의 에너지 장벽을 계산할 수 있는데 이 결과 접촉 저항 특성이 터널링 특성과 비슷하다는 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2004-042-C20017)

### 참고 문헌

- [1] 안승언, 강병현, 김강현, 장유진, 피성훈, 김남희, 이종수, 김상식, 김규태, "ZnO, GaN 나노선 네트워크의 전기적 특성 연구", 전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, 2003.
- [2] Zhiyong Fan, Dawei Wang, Pai-Chun Chang, Wei-Yu Tseng, and Jia G. Lua, "ZnO nanowire field-effect transistor and oxygen sensing property", AAppl. Phys. Lett., Vol 85, No 24, p. 5923, 2004.
- [3] S. E. Ahn, J. S. Lee, H. Kim, S. Kim, B. H. Kang, K. H. Kim, and G. T. Kim, "Photoresponse of sol-gel-synthesized ZnO nanorods", Appl. Phys. Lett., Vol. 84, No. 24, p. 5022, 2004.