

# 유연한 플라스틱 기판 위에서의 ZnO 나노선 FET소자의 전기적 특성

강정민, 김기현, 윤창준, 영동혁, 정동영, 김상식  
고려대학교

## Electrical characteristics of a ZnO nanowire-based Field Effect Transistor on a flexible plastic substrate

Jeongmin Kang, Kihyun Keem, Changjun Youn, Donghyuk Yeom, Dongyoung Jeongm Sangsig Kim  
Korea Univ.

**Abstract :** A ZnO nanowire-based FET is fabricated in this study on a flexible substrate of PES. For the flat and bent flexible substrates, the current ( $I_D$ ) versus drain-source bias voltage ( $V_{DS}$ ) and  $I_D$  versus gate voltage ( $V_G$ ) results are compared. The flat band was  $I_{on}/I_{off}$  ratio of  $\sim 10^7$ , a transconductance of 179 nS and a mobility of  $\sim 10.104 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  at  $V_{DS}=1 \text{ V}$ . Also bent to a radius curvature of 0.15cm and experienced by an approximately strain of 0.77 % are exhibited an  $I_{on}/I_{off}$  ratio of  $\sim 10^7$ , a transconductance of  $\sim 179 \text{ nS}$  and a mobility of  $\sim 10.10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  at  $V_{DS}=1 \text{ V}$ . The electrical characteristics of the FET are not changed very much, although the large strain is given on the device in the bent state.

**Key Words :** ZnO, nanowire, FET, PES

### 1. 서 론

현대의 반도체 산업은 실리콘을 이용한 top-down 방식의 대량 생산에 맞추어 발달해 왔으나, 최근 들어 GaN, Si, ZnO 등의 나노선을 이용한 bottom-up 방식을 이용한 소자 제작이 새로운 제조기술로 주목을 받고 있다.[1] 또한 투명 평판 화면, 스마트 카드, wearable display 등의 요구가 일어 실리콘 기판이 아닌 유리나 휘어짐이 자유로운 플라스틱 기판에 대한 요구가 일어나고 있다. 이에 플라스틱 기판과 나노선을 결합한 새로운 전자 소자의 개발이 중요한 이슈로 떠오르고 있으며 이러한 과제를 실현하기 위해서는 좋은 특성을 가진 나노선과 고온에서 견딜 수 있는 플라스틱 기판이 필요하다.[2]

본 연구에서는 ultra violet(UV) 레이저와 light emitting diode, photodetector, chemical sensor에 이르기까지 그 활용 분야가 다양한 ZnO 나노선과[3] 플라스틱 기판 주에서도 열적 안정도가 가장 높은 PolyEtherSufone(PES) 기판을 이용하여 전계효과트랜지스터(Field Effect Transistor (FET)) 소자를 구현한 후 기판을 구부리기 전과 후의 상태변화에 따른 전기적인 특성을 고찰하였다

### 2. 실험

본 연구에 사용된 ZnO 나노선은 열화학 기상합성법(Thermal Chemical Vapor Deposition)으로 합성되었다. 합성된 ZnO 나노선을 에탄올 용액에 분산 하였고, 투명하고 유연한 플라스틱 기판(PES)위에 나노선을 뿌리고, 광사진식각(Photolithography) 공정을 이용하여 선택적으로 단일 나노선에 소스와 드레인 전극을 증착하기 위한 패턴을 만든 후 열 증착법(Thermal Evaporation)을 이용하여 티타늄(Ti)과 금(Au)을 각각 40nm와 80nm를 증착하였다.

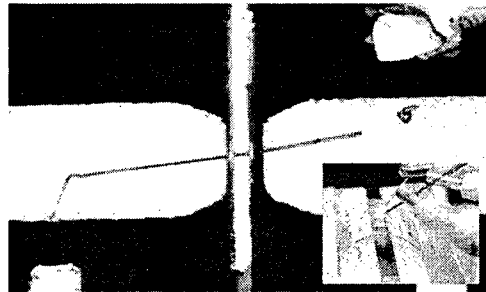


그림 1 단일 ZnO 나노선의 광학 현미경 이미지와 PES 기판에 스트레스를 주고 있는 이미지

그 후 Lift-off 과정을 통하여 소자를 만들었다. 소스-드레인이 형성된 소자에 원차층 증착 방법(Atomic Layer Deposition)을 이용하여 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )을 20nm 증착하였고, 그 위에 게이트 전극을 형성하였다. 그림 1은 실제 제작된 소자의 현미경 이미지로 소자에 사용된 ZnO 나노선의 직경은 약 100nm이며, 소스와 드레인의 사이 간격은  $6\mu\text{m}$ 이고, 게이트 전극은  $3\mu\text{m}$ 이다. 제작된 소자는 반도체 특성 분석장치(Agilent HP4155C)를 이용하여 게이트에 가하는 전압에 변화를 주면서 소스-드레인 사이의 전류( $I$ )-전압( $V$ ) 변화를 측정하였다. 소스-드레인 사이의 전류-전압과 또한 PES기판에 스트레스를 인가 할 수 있는 홀더를 제작하여 스트레스를 인가하지 않을 때와 인가하였을 때의 전기적 특성을 고찰 하였다. 그림 1에 포함된 내부 그림은 만들어진 소자에 스트레스를 가하며 측정할 때의 모습이다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2은 단일 ZnO 나노선에 대한 게이트 전압에 따른 소스-드레인 간의  $I-V$  특성곡선에서 보이듯이 ZnO 나노선과 금속 전극사이에는 배리어가 없이 Ohmic 접촉된 것을 확인할 수 있다. 또한 드레인의 전류값이 게이트 전압이  $-9 \text{ V}$ 에서  $+9 \text{ V}$ 로 변함에 따라 증가함을 알 수 있어

실험에 사용된 ZnO 나노선은 n형 반도체임을 알 수 있다.

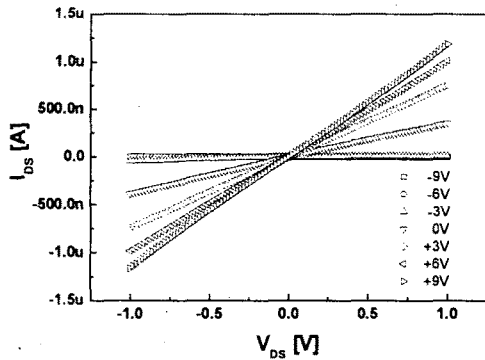


그림 2 게이트 전압에 따른 I-V 특성곡선

그림 3은 Ion/Ioff와 최대 트랜스컨덕턴스를 나타내고 있다. on/off 비는 소자특성을 결정하는 중요한 소자파라미터로서 PES 기판에서 제작된 ZnO 나노선 기반의 FET소자는  $10^7$ 으로 우수한 소자특성을 나타내고 있다. 게이트 변화에 따른 드레인 전류의 변화를 트랜스컨덕턴스의 값으로 변화한 값을 나타내고 있으며, 최대 트랜스컨덕턴스 값은  $V_{GS} = -1.3$  V 일때 179 nS임을 알 수 있다.

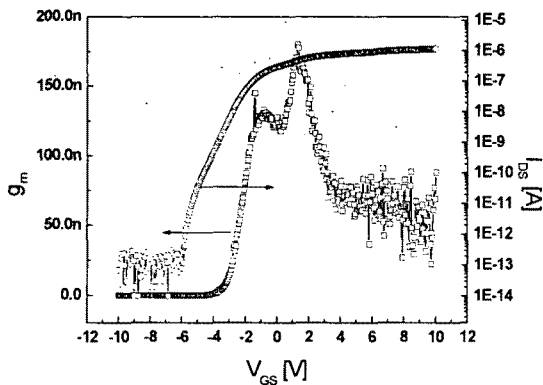


그림 3 단일 ZnO 나노선의 Ion/Ioff 및  $V_{DS}$  1 V 트랜스컨덕턴스

이때  $\epsilon_r=9$ ,  $L_g=3 \mu m$ ,  $r_g=70$  nm,  $r_{nw}=50$  nm이며, 계산된 캐패시턴스는 4.464 pF이다. 또한  $g_m = 1.79$  nS,  $L_c = 6 \mu m$ ,  $V_{DS} = 1$  V의 조건일 때 전자이동도( $\mu_{FE}$ )는  $10.104$   $cm^2/Vs$ 로 나타내었다. 그림 4는 소스와 드레인 사이에 +1 V의 전압차를 유지하면서 게이트 전압을 -10 V에서 +10 V 까지 변화를 준 그래프이다. 이러한 상태에서 PES 기판에 스트레인을 인가하지 않은 경우, 0.77%의 스트레인을 인가한 경우, 스트레인을 준 후 그 스트레인을 제거한 경우 등의 3가지의 특성곡선을 나타낸 것이다. 최초 스트레인을 인가하지 않은 상태에서 문턱전압은 -2.47 V, 스트레인을 인가한 문턱전압은 -2.47 V, 마지막으로 스트레스 요인을 제거한 상태의 문턱전압의 변화는 거의 나타나지 않았다. 또한 게이트 전압이 10 V를 가했을 경우에도 스트레스 인가 전후에 전류의 변화가 크지 않음을 관

측하여 ZnO 나노선을 이용한 전자소자가 이 스트레스에 무관 하게 일정한 동작하는 것을 확인하였다.

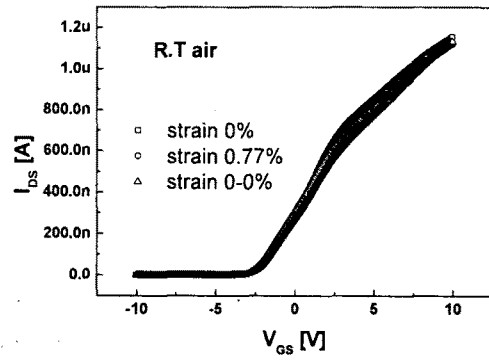


그림 4 단일 ZnO 나노선의 스트레스 비교 IDS-VGS

#### 4. 결론

본 실험에서는 24시간 불-밀 처리된 ZnO 분말을 열화학 기상증착법에 의하여 합성되었다. 단일 나노선을 선택하여 광사진식각 공정을 이용하여 PES 기판위에 패터닝 하였다. 단일 ZnO 나노선의 전류-전압에서 음성 접촉 특성을 나타내었고, 게이트 전압에 따른 소스 드레인 전류의 변화로 보아 n-형의 ZnO 나노선임을 알 수 있었다. 또한 게이트 전압에 따른 소스 드레인의 전압 변화 곡선에서 나타났듯이 단일 ZnO 나노선은 FET 소자로서 동작을 하는 것을 확인 할 수 있었고, 드레인 전류의 Ion/Ioff 비가  $10^7$  이상인 것을 볼 수 있다. 또한 PES 기판을 이용하여 기판에 0% ~ 0.77%의 스트레스를 가하여 측정 결과 스트레스 0%일 때 전자이동도는  $10.104$   $cm^2/Vs$ , 스트레스 0.77%일 때  $10.10$   $cm^2/Vs$ 였다. 다시 스트레스 0%로 측정하였을 때  $10.101$   $cm^2/Vs$ 로 스트레스를 인가한 경우와 인가하지 않은 경우에 전자이동도의 차이는 미묘한 것을 확인 할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 나노핵심기반기술개발사업 및 국가지정연구실사업 연구 지원으로 수행 되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] W. Hemsley, and J. R. Sizelove, "Residual Native Shallow Donor in ZnO", Phys. Rev. Lett. 82, 2552 (1999).
- [2] Michal C. Mcalpine, Robin S. Friedman, AND Charles M. Libber, "High-Performance Nanowire Electronics and Photonics and Nanoscale Patternin on Flexible Plastic Substrate", IEEE, VOL. 93, NO. 7, p1357-1363, 2005
- [3] M. Iwaya, S. Takamami, A. Miyazaki, Y. Watanabe, S. Kamiyama, H. Amano, and I. Akasaki, " High-Power UV-Light-Emitting Diode on Sapphire", Jpn. J. Appl. Phys., Part I 42, 400 2003.