

단일 ZnO 나노선 4단자 소자의 전기적 특성

Electrical Properties of a Single ZnO Nanowire in a Four-probe Configuration

김강현¹, 강해용¹, 임찬영¹, 전대영¹, 김혜영¹, 김규태^{1,a}, 이종수², 강 원³

(Kang-hyun Kim¹, Hae-yong Kang¹, Chan-young Yim¹, Dae-young Jeon¹, Hye-young Kim¹, Gyu-Tae Kim^{1,a}, Jong-Soo Lee², and Woun Kang³)

Abstract

Four-probe device of single ZnO nanowire was fabricated by electron beam lithography. Electrical characterizations in a two-probe and a four-probe configuration with a back-gate were carried out to clarify the relative contribution of the contact and the intrinsic part in a ZnO nanowire. I-V characteristic in four-probe measurement showed an ohmic behavior with a high conductivity, 100 S/cm, which was better than those of two-probe measurement by 10 times. At the same values of the current between two-probe and four-probe, the net voltage applied inside the nanowire were extracted with calculated voltages at the contact. Four-probe current-gate voltage characteristics showed bigger tendencies than those of two-probe measurement at low temperatures, indicating the reduced gate dependence in two-probe measurements by the existence of the contact resistance.

Key Words : ZnO nanowire, Field effect transistor, Contact resistance, Four-probe device

1. 서 론

최근까지 활발히 연구되어온 나노선은 그 합성 방법에서부터 다양한 특성의 소자구현에 이르기까지 다양한 분야에서 연구되고 있다. 이러한 나노선의 종류는 탄소 나노튜브에서부터 기존의 반도체 산업에서 쓰이는 실리콘 나노선, III-V 족 반도체인 GaN와 II-VI 족인 ZnO 까지 그 물질이 매우 다양하다[1-3]. 이러한 나노선을 이용해 많은 소자들이 구현되었는데 그 예로는 field effect transistor (FET), light emitting diode, photo detector, chemical sensor 등을 들 수 있다[4-6]. 이렇게 나노 크기의 물질들의 기본적인 특성과 소자로써의

응용에 관한 연구가 많이 발표되었지만 아직도 안정화된 소자 특성 구현이나 상업적인 응용을 위한 소자의 특성 연구는 미진한 편이다. 이러한 문제들 중에 금속과 반도체사이의 접촉에서 생기는 불규칙적인 포텐셜 장벽의 문제는 안정적 소자를 구현 하는데 있어 많은 영향을 끼친다. 이러한 문제점은 나노 크기의 물질에서는 접촉 자체가 매우 작은 나노 크기의 면적에서 이루어지기 때문에 그 영향이 더 크다고 할 수 있다. 이런 나노선 소자의 접촉 특성을 연구하기 위하여 단일 나노선을 이용한 4단자 시료를 만들어 전기적 특성을 측정하였다. 나노선으로는 3.37 eV의 큰 밴드 갭을 가지는 ZnO 나노선을 이용하였다. 이것은 보통 oxygen vacancies와 zinc interstitial에 의해서 n-type 특성을 보이는 것으로 알려져 있다[6-8]. 이러한 ZnO 단일 나노선을 이용해 만든 4단자 소자와 기판의 back gate를 이용한 전기적 특성 연구를 통해 금속과 반도체 나노선의 접촉 특성과 접촉 특성이 배제된 나노선 자체의 특성을 연구 할 수 있을 것이다.

- 1. 고려대학교 전기공학과
(서울시 성북구 안암동 5가 1)
 - 2. Dept. of Chemical Engineering & Material Science, University of California, Davis
 - 3. 이화여자대학교 물리학과
- a. Corresponding Authors : gtkim@korea.ac.kr
 접수일자 : 2005. 9. 29
 1차 심사 : 2005. 10. 18
 심사완료 : 2005. 11. 5

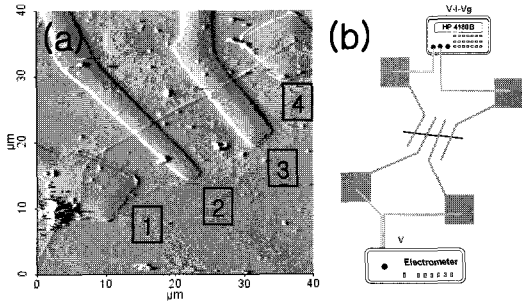


그림 1. (a) 단일 ZnO 나노선 소자의 scanning probe microscope (SPM) 이미지와 전극 번호 (b) 4단자 I-V 특성 측정을 위한 소자와 기기의 모습.

Fig. 1. (a) SPM image of a single individual ZnO nanowire device. Four electrodes on the sample are clearly defined and are numbered from left to right. (b) Schematic of four-probe measurement system.

2. 실험

이번 실험에 쓰인 ZnO 나노선은 일반적으로 많이 쓰이는 chemical vapor deposition (CVD) 방법으로 합성하였으며 단일 나노선 소자를 만들기 위하여 전자빔을 이용한 리소그래피 기술을 이용하였다. 합성된 ZnO 나노선을 기판에서 떼어내어 적당한 농도로 isopropyl alcohol에 분산 시켜 300 nm의 SiO₂가 있는 실리콘 기판 위에 뿌린다. 기판 위에 있는 ZnO 나노선 중 패턴하기 적당한 나노선을 선택한 후 그 위에 4단자전극을 전자빔을 이용한 리소그래피로 만들었다. 이와 같은 과정이 끝난 후 Ti/Au 전극을 각각 30/50 nm 증착 후 lift off 하였다. 최종적으로 rapid thermal annealing (RTA) 처리를 350도에서 2분간 실시하여 소자를 완성하였고 그림 1(a)에서와 같이 scanning probe microscope (SPM) 이미지를 통해 소자를 확인할 수 있었다. 그림 1(a)에서 나노선의 두께는 약 24 nm으로 기존에 측정결과와 같이 보고되었던 ZnO 나노선보다 지름이 작다. 각 전극 사이의 거리는 전극 1번과 2번 사이는 6.5 μm , 2번과 3번 사이는 8.5 μm 이고 3번과 4번 사이는 4.4 μm 이다. 완성된 소자를 저온 장치에 넣고 그림 1(b)에서와 같이 HP4140B와 KEITHLEY 614 electrometer를 이용

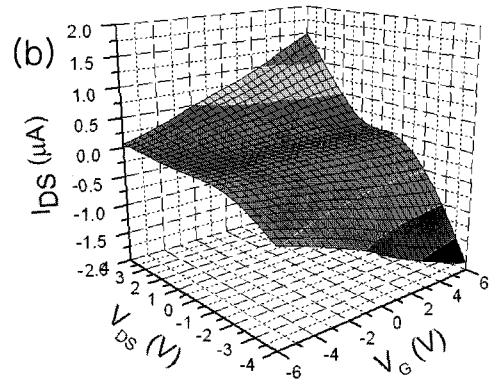
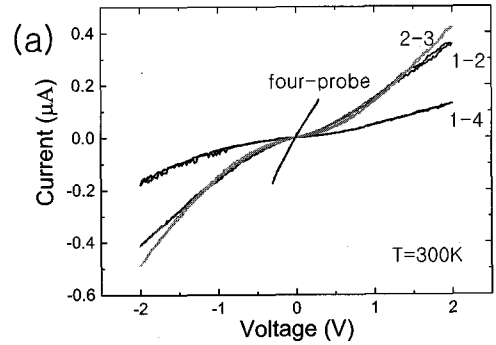


그림 2. (a) 각 전극을 이용하여 측정한 2단자와 4단자의 I-V 특성 곡선. (b) 전극 2와 3 사이에서 측정한 전류전압특성의 게이트 전압 의존성.

Fig. 2. (a) I-V characteristics between different pairs of electrodes at room temperature. (b) Gate dependence of the current-voltage characteristics between 2 and 3.

하여 4단자와 2단자의 전기적 특성을 게이트전압을 바꾸어 주면서 측정하였다. 그림 1(b)는 4단자 측정을 위한 실험 장비를 보여주는 것으로 접촉 저항을 제외한 시료 자체의 저항을 측정할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

그림 2(a)는 각각의 전극에 대한 2단자와 4단자의 I-V 특성을 측정한 것이다. 2단자의 I-V 특성은 비선형이며 거리가 가장 긴 전극인 1-4의 전류가 가장 작게나와 저항이 가장 큰 것을 알 수 있었으며 길이가 비슷한 전극 1-2, 2-3의 I-V 특성 곡선은 비슷한 전류를 나타내 저항 또한 비슷한 것을 알 수 있었다. 4단자측정에서는 선형적으로

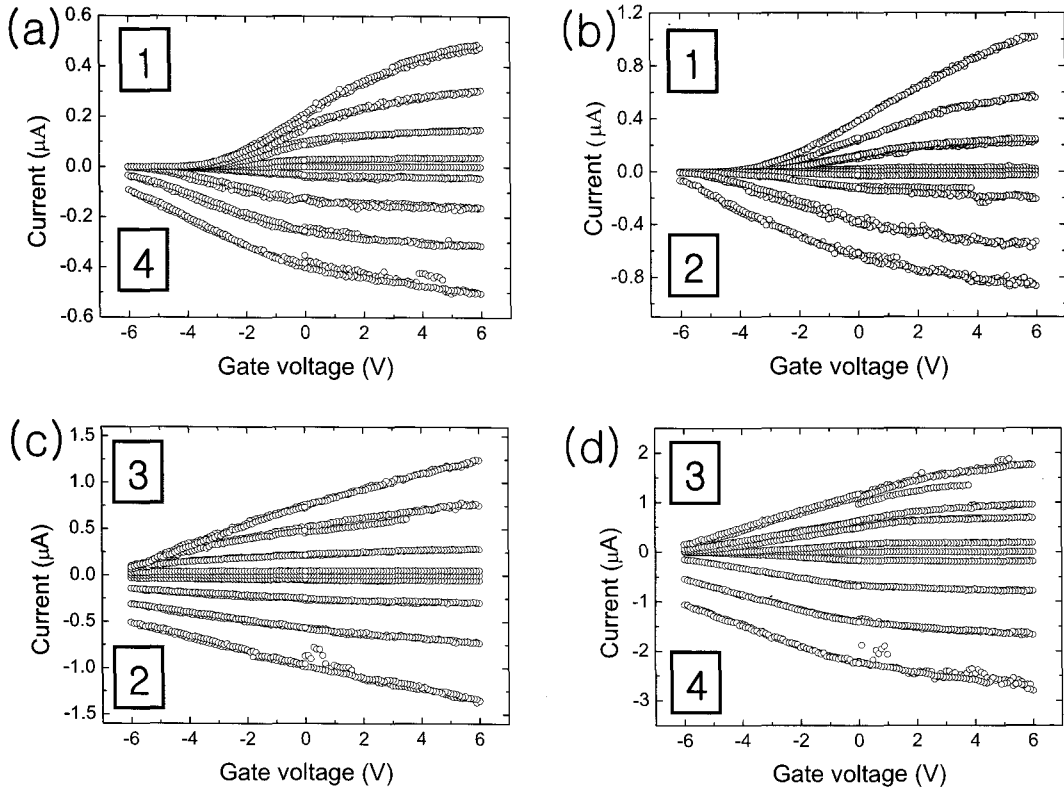


그림 3. 각 전극을 통하여 구한 FET 특성 곡선 (a) 전극 1과 4, (b) 전극 1과 2, (c) 전극 2와 3, (d) 전극 3과 4, 각 그림에서 소스-드레인 전압은 아래 곡선으로부터 위쪽으로 -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4 V 이다. 그림에서의 위의 숫자는 소스-드레인 전압이 양일 때 크게 영향을 미치는 전극이며 밑의 숫자는 소스-드레인 전압이 음일 때 크게 영향을 미치는 전극을 표시한 것이다.

Fig. 3. FET characteristics obtained between electrode (a) 1 and 4 (b) 1 and 2 (c) 2 and 3 (d) 3 and 4 as indexed in Fig. 1. Source-drain voltage corresponds to -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, and 4 from the bottom to the top. Upper number indices in the insets correspond to the positive voltage in each voltage axes.

증가하는 I-V 특성을 가지는 것을 볼 수 있고 전류도 가장 커 저항이 가장 작은 것을 알 수 있었다. 이때 저항은 1.9 MΩ 으로 2단자 측정에서보다 약 10배가량 작은 값을 보였다. 4단자의 저항을 전도도로 계산하면 약 100 S/cm 로 기존에 보고된 것보다 상대적으로 큰 값을 보였다[6-8]. 이러한 4단자와 2단자 측정에서의 저항의 큰 차이는 결국 일반적인 2단자 나노선 소자의 특성에서 접촉저항이 큰 영향을 주고 있음을 나타내주고 있는 것이다. 그림 2(b)는 전극 2번과 3번 사이의 field effect transistor 특성을 source와 drain사이에 전압을 변화시키고 gate전압을 변화시키면서 측정한

그래프이다. 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 n-channel depletion mode 특성을 잘 보여 주고 있다. FET 실험 결과를 이용하여 전하 이동도를 구해보면 10 ~ 40 cm²/Vs 정도의 값을 보였고 전하 농도는 약 10¹⁸ ~ 10¹⁹ cm⁻³ 정도의 값을 보여 기존에 보고된 값들보다 큰 특성을 보여주었다. 그림 3은 각 전극에서 측정된 FET 특성 곡선이다. 그림 3(a)는 전극 1번과 4번 사이, 그림 3(b)는 전극 1번과 2번 사이, 그림 3(c)는 전극 2번과 3번 사이, 그림 3(d)는 전극 3번과 4번 사이에서 측정된 FET 특성 곡선이다. 각각의 FET 특성 곡선은 소스 - 드레인 전압이 -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4 일

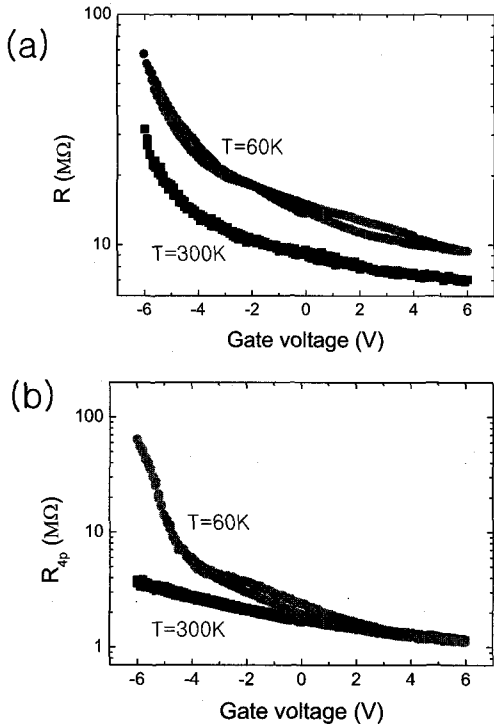


그림 4. (a) 가운데 두 전극(2-3) 사이의 gate 전압에 따른 상온(사각형)과 T=60 K(원형)에서의 2단자 저항특성. (b) 상온(사각형)과 T=60 K(원형)에서 4단자로 측정된 저항의 gate 전압에 따른 특성.

Fig. 4. (a) Middle two electrodes (2-3) resistance and (b) four-probe resistance with sweeping the gate voltage at room temperature (square) and T=60 K (circle).

때의 전류곡선이다. 각각의 그림에서 전류특성은 전극에 따라 서로 다른 특성을 보여주고 있다. 그림에서의 각 번호는 그에 상응하는 전극의 전류 특성을 나타내는 것으로 서로 다른 그림의 각 전극의 전류 특성은 서로 비슷한 모양을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이렇게 같은 하나의 나노선에 형성된 4개의 전극에서 서로 다른 양상의 FET 특성 곡선을 나타내는 것을 통해 나노선의 FET 특성은 전극과 나노선의 nanocontact에 많은 영향을 받을 수 있다.

그림 4는 게이트전압의 따른 전극 2와 3사이의 나노선 저항의 변화를 2단자와 4단자로 측정한 것이다. 그림에서 원 모양의 데이터는 T=60 K 일 때

를 나타내며 사각형 모양은 상온일 때의 데이터를 나타낸다. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 2단자 게이트전압-저항특성은 상온에서나 T=60 K 에서도 게이트 특성이 비슷한 것을 볼 수 있었으며 전류에 있어서는 차이가 크지 않았다. 하지만 그림 4(b)에서의 4단자 측정에서의 저항은 상온에서보다 저온에서 게이트전압에 영향을 상대적으로 많이 받아 변화에 폭이 커진 것으로 생각할 수 있다. 게이트전압이 양으로 많이 커지면 상온에서의 값과 비슷한 값을 보였으며 게이트전압이 음으로 많이 작아지면 상온에서의 값과 차이가 더욱 커지는 것을 알 수 있었다. 이러한 특성은 온도의 영향이 줄어들어 상대적으로 게이트전압에 영향이 커지면서 생기는 특성으로 생각된다. 그림 4에서 두 그림을 비교하여보면 상온에서는 4단자의 경우 게이트전압에 따라 저항이 선형적으로 변하지만 2단자의 경우는 음의 게이트전압으로 갈수록 급격하게 늘어나는 것을 볼 수 있다. 또한 저온에서 4단자의 특성은 게이트전압에 많은 영향을 받아 그 변화의 폭이 굉장히 크나 2단자에서는 그 변화가 상온에서와 비슷하다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 상반되는 특성은 결국 FET 특성이 나노선 자체의 특성보다는 나노선과 전극의 nanocontact의 영향을 크게 받는 것을 보여주고 있는 것이다.

4. 결론

ZnO 나노선을 이용하여 만든 4단자 소자를 이용하여 I-V 특성과 FET 특성을 측정하였다. 4단자로 측정된 저항은 1.9 MΩ 으로 전도도로 계산하면 약 100 S/cm 정도의 값을 나타내었다. 이러한 저항은 2단자 측정에서보다 10배 정도 큰 값이다. FET 특성 측정에서는 전하이동도가 크기는 40 cm²/Vs 까지 되었으며 전하농도는 10¹⁸에서 10¹⁹ cm⁻³ 까지의 값을 보였다. 각각의 전극을 통해 얻은 게이트전압에 따른 소스-드레인 전류 특성을 보면 전극에 따라서 그 특성이 달라지는 것을 알 수 있었다. 게이트전압에 따른 4단자와 2단자 저항의 변화를 살펴보면 나노선 자체의 특성 변화를 나타내는 4단자의 특성은 2단자의 특성과는 많은 차이를 보였다. 이러한 차이로 볼 때 2단자의 I-V 특성뿐만 아니라 FET 특성 또한 나노선과 전극 사이의 nanocontact의 영향에 의해서 지배되는 것을 알 수 있었다. 이러한 문제는 나노선 연구에 있어서뿐만 아니라 안정적인 실용화를 위해서도 해결해야 될 문제일 것이다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-042-C00017).

참고 문헌

- [1] 안승언, 강병현, 김강현, 장유진, 피성훈, 김남희, 이종수, 김상식, 김규태, "ZnO, GaN 나노선 네트워크의 전기적 특성 연구", 한국전기전자재료학회 2003하계학술대회논문집, p. 67, 2003.
- [2] Z. Fan, D. Wang, P.-C. Chang, W.-Y. Tseng, and J. G. Lua, "ZnO nanowire field-effect transistor and oxygen sensing property", *Appl. 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, "Photo-response of sol-gel-synthesized ZnO nanorods", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, No. 24, p. 5022, 2004.
- [4] K. H. Keem, H. S. Kim, G.-T. Kim, J. S. Lee, B. D. Min, K. A. Cho, M.-Y. Sung, and S. S. Kim, "Photocurrent in ZnO nanowires grown from Au electrodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, No. 22, p. 4376, 2004.
- [5] Q. H. Li, Q. Wan, Y. X. Liang, and T. H. Wang, "Electronic transport through individual ZnO nanowires", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, No. 22, p. 4556, 2004.
- [6] Z. Fan and J. G. Lu, "Gate-refreshable nanowire chemical sensors", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, No. 12, p. 123510, 2004.
- [7] J. Goldberger, D. J. Sirbully, M. Law, and P. Yang, "ZnO nanowire transistors", *J. Phys. Chem. B*, Vol. 109, No. 1, p. 262, 2005.
- [8] Y. W. Heo, L. C. Tien, Y. Kwon, D. P. Norton, S. J. pearton, B. S. Kang, and F. Ren, "Depletion-mode ZnO nanowire field-effect transistor", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, No. 12, p. 2274, 2004.