[논 문] 한국재료학회지
Korean J. Mater. Res.
Vol. 28, No. 1 (2018)
https://doi.org/10.3740/MRSK.2018.28.1.32

일산화질소 가스 검출을 위한 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 구조의 제작 및 특성 평가

유환수[1] · 김효진[1,2†] · 김도진[1,2]
[1]충남대학교 차세대기판학과, [2]충남대학교 공과대학 신소재공학과

Fabrication and Characterization of CuO Thin Film/ZnO Nanorods Heterojunction Structure for Efficient Detection of NO Gas

Hwansu Yoo[1], Hyojin Kim[1,2†] and Dojin Kim[1,2]
[1]Graduate School of Advanced Circuit Substrate Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea
[2]Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Deajeon 34134, Republic of Korea

(Received October 23, 2017 : Revised November 15, 2017 : Accepted November 16, 2017)

Abstract We report on the efficient detection of NO gas by an all-oxide semiconductor *p-n* heterojunction diode structure comprised of *n*-type zinc oxide (ZnO) nanorods embedded in *p*-type copper oxide (CuO) thin film. The CuO thin film/ZnO nanorod heterostructure was fabricated by directly sputtering CuO thin film onto a vertically aligned ZnO nanorod array synthesized via a hydrothemal method. The transport behavior and NO gas sensing properties of the fabricated CuO thin film/ZnO nanorod heterostructure were charcterized and revealed that the oxide semiconductor heterojunction exhibited a definite rectifying diode-like behavior at various temperatures ranging from room temperature to 250 °C. The NO gas sensing experiment indicated that the CuO thin film/ZnO nanorod heterostructure had a good sensing performance for the efficient detection of NO gas in the range of 2-14 ppm under the conditions of an applied bias of 2 V and a comparatively low operating temperature of 150 °C. The NO gas sensing process in the CuO/ZnO *p-n* heterostructure is discussed in terms of the electronic band structure.

Key words oxide semiconductor, oxide heterostructure, gas sensor, zinc oxide, copper oxide.

1. 서 론

최근에 인류가 유발한 대기 오염 및 유독 가스의 돌발적 누출에 대한 우려가 커지면서 공기 중 다양한 유해 가스를 효과적으로 검출할 수 있는 고성능 가스 센서에 대한 긴급한 수요가 증가하고 있다. 이런 유독 가스들 가운데 질소 산화물(NO_x) 가스는 가정용 및 산업용 연소 기기와 자동차에서 배출되는 심각한 대기 오염원 중의 하나로서 인간의 호흡기와 신경계통에 치명적인 손상을 줄 뿐 아니라, 광화학적 스모그와 산성비의 원인이 되는 가스로 알려져 있다. 이 중에서 일산화질소(NO) 가스는 유독한 이산화질소(NO_2) 가스의 원천일 뿐 아니라 광화학적 스모그의 주범으로 알려져 있는 매우 유해한 가스다.[1)] 주로 내연 기관 내 화석 연료의 연소에서 비롯되는 NO 가스는 물에 약간 용해되며 호흡할 때 질산을 형성함으로써 호흡기의 점막을 자극하게 된다. 공기 중 NO 가스의 농도를 추적 관찰하는 것은 유익한데, 왜냐하면 환경 기관은 이 자료를 이용하여 스모그 발생 확률을 예측할 수 있기 때문이다. 따라서 NO 가스 센서는 예방적 안전 모니터로서 필요한 소자이다.

†Corresponding author
E-Mail : hyojkim@cnu.ac.kr (H. Kim, Chungnam Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

NO 가스 센서에 대해 최근에 집중적으로 이루어진 연구의 결과로서 몇 가지 유형의 NO 가스 센서가 제안되었다. 이것들 가운데 가장 실용적이고 효과적인 유형은 산화아연(ZnO)과 산화구리(CuO)를 비롯한 산화물 반도체(oxide semiconductor)를 감지체로 활용하는 산화물 반도체 가스 센서인 것으로 알려져 있다.[2] 산화물 반도체 가스 센서는 그것이 검출 대상 가스에 노출되었을 때 감지체 표면에서 일어나는 가스 흡착 반응에서 비롯되는 전기 저항 변화에 근거하여 작동한다. 그런데 지금까지 대체로 산화물 반도체 기반 가스 센서들은 200 ºC 이상의 비교적 높은 작동 온도(operating temperature)가 필요하고 감도(sensitivity)도 꽤 낮은 편(대체적으로 50 % 이하)으로 알려져 있다.[3]

최근에 크기와 모양 등을 제어할 수 있는 ZnO 및 CuO 나노구조체 합성 기술이 개발됨으로써 가스 감지 특성을 향상시킬 수 있는 좋은 여건이 마련되었는데, 왜냐하면 나노결정(nanocrystal), 나노선(nanowire), 나노막대(nanorod) 등의 구조를 활용하는 가스 센서는 가스 표면 반응의 유효면적을 넓힐 수 있기 때문이다.[4-12] 특히 수직으로 정렬된 ZnO 나노막대에 기반을 둔 가스 센서의 감지 성능이 두드러지게 향상된다는 연구 결과가 보고되었다.[9-12] 수직으로 정렬된 ZnO 나노막대는 효과적인 나르개 축적을 위한 직접적인 경로뿐 아니라 흡착된 산소 이온과 검출 가스 사이의 표면 상호작용을 위한 다양한 채널도 제공하기 때문에 정렬되지 않은 나노막대보다 더 많은 표면을 노출시키게 되고, 그래서 ZnO 나노막대의 감지 특성이 향상된다고 알려져 있다.[9] 여기서 ZnO을 비롯한 산화물 반도체 나노막대는 주로 수열합성법을 포함하여 용액 공정을 사용하여 합성되는데, 용액 공정은 진공 공정과 달리 비용을 두드러지게 감소시키는 저온 공정 가능성의 특별한 이점을 갖추고 있다.[13,14] 다른 한편으로, 비교적 높은 효율성과 감도 덕분에 다른 산화물 반도체들과 결합된 ZnO 기반 *p-n* 이종접합 구조체들이 태양전지, 광검출기 그리고 가스 센서 같은 다양한 전자 소자, 광전 소자 그리고 전기화학 소자의 핵심적인 기술로 간주된다.[15-17] 이 논문에서는 3.37 eV의 밴드갭(band gap)을 갖는 *n*-형 산화물 반도체 ZnO와 결합하여 산화물 이종접합 구조체를 형성할 수 있는 *p*-형 산화물 반도체로서 CuO를 선택하였다. 단사결정 구조를 갖는 CuO는 비교적 좁은 1.36 eV의 밴드갭을 나타내고, 저렴한 공정 비용과 양호한 전기적 및 광학적 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다.[18] 근자에 ZnO와 CuO을 활용한 *p-n* 이종접합 구조체들이 태양전지와 가스 센서용으로 제작되었다.[19-21]

본 논문에서는 산화인듐주석(ITO)이 코팅된 유리 기판 위에 수열합성법을 이용하여 합성된 ZnO 나노막대 집합체 및 그 위에 스퍼터링(sputtering)법을 이용하여 형성된 CuO 박막으로 이루어진 CuO/ZnO 산화물 반도체 *p-n* 이종접합 구조체를 제작하였다. 제작된 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 구조체의 구조적 특성을 확인한 다음에 정류 및 일산화가스 감지 특성을 체계적으로 조사하였다. 여기서 우리는 산화물 반도체 CuO 박막/ZnO 나노막대 *p-n* 이종접합 구조체가 낮은 비용, 높은 성능의 NO 가스 센서용 감지체로써 유망하다는 점을 제시할 것이다.

2. 실험 방법

먼저 ZnO 나노입자를 씨앗층(seed layer)으로 활용하는 수열합성법을 통해서 ITO가 코팅된 유리 기판 위에 *n*-형 ZnO 나노막대 집합체를 성장시켰다.[22] ZnO 씨앗층을 형성하기 위해 우선 스퍼터링법을 사용하여 나노미터 두께의 ZnO 금속 박막을 순수한 Zn 금속 타겟으로부터 ITO가 코팅된 유리 기판 위에 증착하였다. Zn 금속 박막은 상온에서 5 mTorr의 Ar 분위기 하에서 2분 동안 증착하였다. 그 다음에 ZnO 나노막대 성장용 씨앗으로서의 ZnO 나노입자를 형성하기 위해 급속 열처리 공정을 사용하여 600 ºC에서 건조한 공기 분위기 하에서 1시간 동안 Zn 박막을 산화시켰다. 준비된 ZnO 씨앗층 위에 수열합성법을 사용하여 수직으로 정렬된 ZnO 나노막대 집합체를 성장시켰는데, 여기서 사용된 수열합성용 용액은 50 mM의 질산 제2아연 6수화물[$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$]과 50 mM의 헥사메틸렌테트라민($C_6H_{12}N_4$)를 계량한 다음에 자기 교반자를 사용하여 균일하게 혼합하여 준비하였다. 그 다음에 ZnO 씨앗층이 형성된 기판을 준비된 용액에 담근 후 95 ºC에서 6시간 동안 오븐에서 가열하여 ZnO 나노막대 집합체를 성장시켰다. ZnO 나노막대 집합체가 코팅된 기판은 세척 후 건조한 공기 분위기에서 열처리 공정을 400 ºC에서 1시간 동안 진행하였다.

산화물 반도체 이종접합을 형성하기 위해 사전에 합성된 ZnO 나노막대 집합체 위에 CuO 박막을 rf 마그네트론 스퍼터링법을 사용하여 성장시켰다. 먼저 Cu 금속 박막을 상온에서 5 mTorr의 Ar 분위기 하에서 20분 동안 증착한 다음에 건조한 공기 분위기에서 열처리 공정을 600 ºC에서 1시간 동안 진행함으로써 CuO 박막을 형성하였다. 마지막으로 얻어진 CuO 박막/ZnO 나노막대 산화물 반도체 이종접합에 대한 열처리 공정을 건조한 공기 분위기에서 400 ºC에서 1시간 동안 진행하였다.

제작된 CuO 박막/ZnO 나노막대 산화물 반도체 이종접합의 결정상을 알아보기 위해 X선 회절 분석기(XRD)를 사용하였으며, 미세구조 분석을 위해 냉전계형 장방

출 주사전자현미경(SEM)를 이용하였다. 이종접합 구조체의 전기적 특성 및 NO 가스 감지 특성을 조사하기 위해 $1.0 \times 1.0\ cm^2$의 면적을 갖는 두 개의 사각형 Ag 접촉을 CuO와 ITO 표면 위에 형성하였다. 건조한 공기 중에서 그리고 NO 가스에 노출된 상태에서 이종접합의 전류-전압(*I-V*) 특성은 Keithley 2400 소스 미터와 자체 제작한 가스 감지 특성평가 장치를 사용하여 측정하였다. 일산화질소 가스 감지 특성을 측정하는 동안, 건조 공기 속 NO 가스의 농도는 총 흐름속도를 500 sccm으로 유지하는 상태에서 질량식 유량조절기를 사용하여 2 ppm에서 14 ppm까지 변화시켰으며, 센서의 작동온도는 상온에서 250 ºC까지 정확하게 조절되었다.

3. 결과 및 고찰

ITO가 코팅된 유리 기판 위에 형성된 ZnO 나노막대 집합체와 CuO 박막/ZnO 나노막대 산화물 반도체 이종접합에 대해 관측된 전형적인 SEM 영상을 Fig. 1(a)와 1(b)에 각각 나타내었다. 한편으로, 이 영상들로부터 수열합성된 ZnO 나노막대들이 대략 40 nm의 평균 직경과 대략 500 nm의 길이를 갖고서 수직으로 촘촘히 성장한 것을 알 수 있다. 다른 한편으로, 제작된 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종구조의 단면 SEM 영상으로부터 확연히 구별되는 ITO 층의 표면 위에 대략 400 nm의 두께를 갖는 CuO 박막 층이 ZnO 나노로드 집합체 층을 촘촘하고 덮고 있다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 CuO 박막 층이 ZnO 나노막대들을 커튼처럼 덮고 있으며 그 아래에 나노막대의 형상이 두드러지게 보이는데, 이것은 CuO 박막 속에 ZnO 나노막대들이 묻어 들어가 있다는 것을 가리킨다.

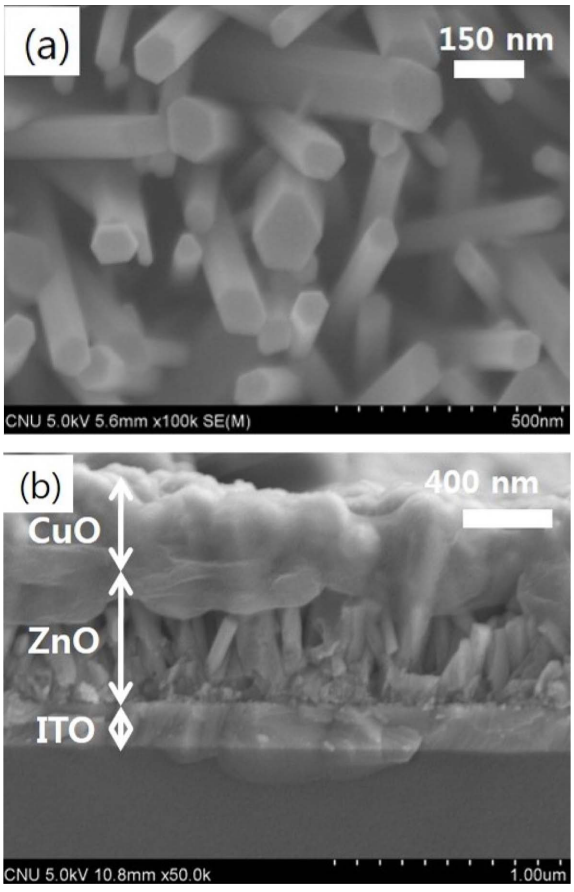

Fig. 1. Typical SEM images showing (a) top-view of the vertically aligned ZnO nanorod array and (b) cross-sectional view of the CuO thin film/ZnO nanorods heterostructure fabricated on an ITO-coated glass substrate.

산화물 ZnO 및 CuO 결정상의 형성을 확인하기 위해 X-선 회절 실험을 수행하였다. Fig. 2는 제작된 CuO 박막/ZnO 나노막대 산화물 반도체 이종접합 구조체에 대해 관측된 전형적인 XRD 패턴을 보여준다. 이 그림에서 표시된 것처럼, ITO 층에서 비롯된 회절선들을 제외하면, 관측된 회절선들은 육방정계 우르짜이트(hexagonal wurtzite) ZnO 결정상(JCPDS Card No. 36-1451) 또는 단사정계 테노라이트(monoclinic tenorite) CuO 결정상(JCPDS Card No. 80-1268)에서 비롯된 것으로 분석되었다. 여타의 이차상은 전혀 검출되지 않았으며, ZnO 및 CuO는 다결정질로 성장하였음을 알 수 있다.

산화물 반도체 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 구조체의 전류-전압(*I-V*) 특성을 건조한 공기 중에서 온도를 상온에서 250 ºC까지 변화시켜 가면서 측정한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 Fig. 3의 삽입그림은 산화물 반도체 이종구조의 도식적 회로도를 보여준다. Fig. 3에 나타낸 모든 *I-V* 곡선들은 다이오드의 정류 특성 거동을 분명히 보여주는데, 이것은 전형적인 반도체 *p-n* 접

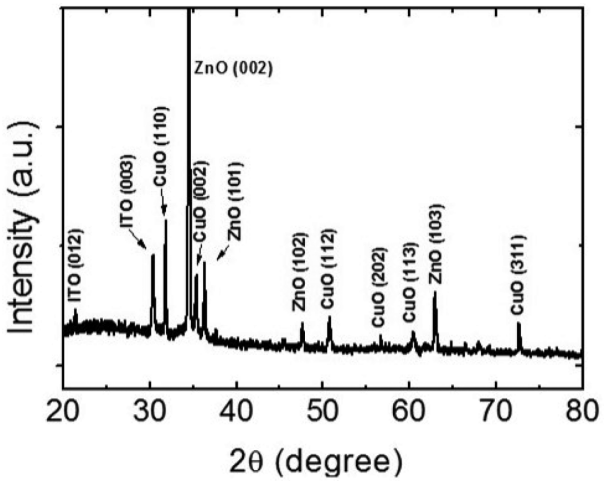

Fig. 2. Typical X-ray diffraction pattern of the CuO thin film/ZnO nanorods heterostructure fabricated on an ITO-coated glass substrate.

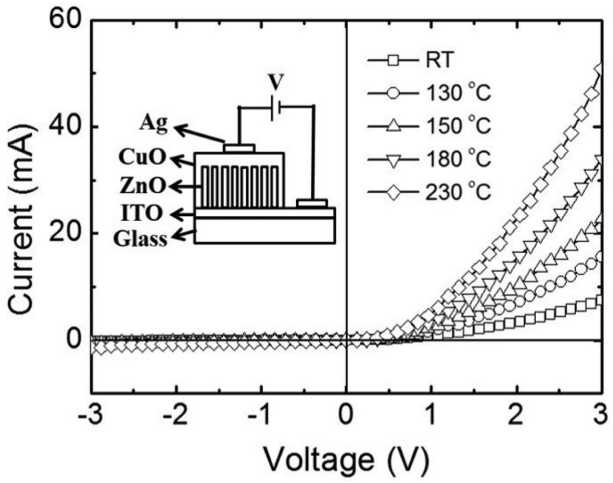

Fig. 3. Current-voltage(*I-V*) characteristic curves of the CuO thin film/ZnO nanorods heterostructure in dry air at several temperatures. The inset shows a schematic circuit of the oxide semiconductor *p-n* heterojunction device.

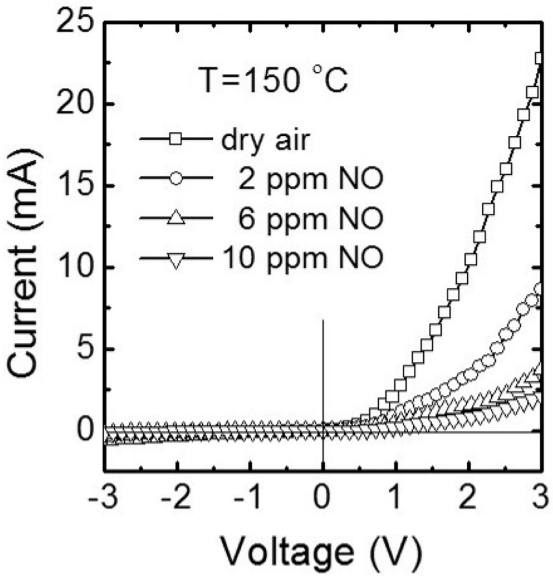

Fig. 4. Current-voltage(*I-V*) characteristic curves of the CuO thin film/ZnO nanorods heterojunction diode structure before and after being upon exposure to 2, 6 and 10 ppm NO gas in dry air at 150 °C.

합이 형성되었음을 가리킨다. 온도가 올라감에 따라 산화물 *p-n* 이종접합의 턴온 전압(turn-on voltage)은 점진적으로 감소하는 한편으로 순방향 전류(forward current)는 또렷하게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 반도체 물질에 대해 전형적으로 예상되는 결과이다. 이 현상은 산화물 이종구조에 있어서 온도 상승에 따라 전위장벽(potential barrier)의 높이 감소와 공핍 영역(depletion region)의 너비 축소에서 기인하는 것으로 여겨진다.[23)]

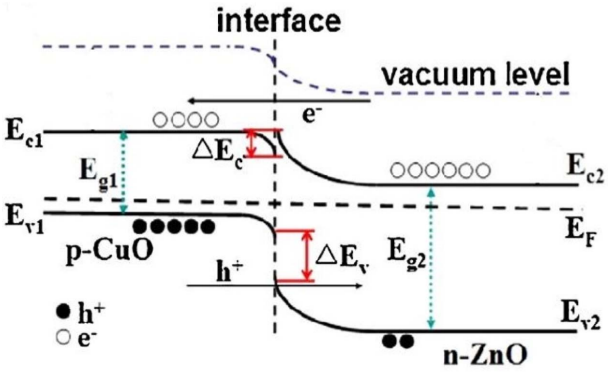

Fig. 5. Schematic energy band diagram of the *p*-CuO/*n*-ZnO heterojunction structure.

제작된 산화물 반도체 이종구조의 가스 감지 성능을 조사하기 위해 여러 온도에서 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 구조체를 건조 공기 중 미량의 NO 가스에 노출시켰다. 전기적 특성을 측정하는 동안 건조 공기 중 NO 가스의 농도를 2 ppm에서 14 ppm까지 변화시켰다. Fig. 4는 150 °C의 작동 온도에서 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 구조에 대해 건조 공기 중에서 측정한 *I-V* 특성 곡선과 건조 공기 중 농도가 2, 6, 10 ppm인 NO 가스에 노출되었을 때의 *I-V* 특성 곡선들을 보여준다. 여기서 전자를 포획하는 산화성 가스인 NO 가스에 노출되었을 때, 산화물 반도체 CuO 박막/ZnO 나노막대 *p-n* 이종접합 구조의 순방향 전류가 NO 가스 농도가 증가함에 따라 감소하는 것을 분명히 볼 수 있다. 이 현상은 *p*-형 CuO 표면이 산화성 가스 NO에 노출되었을 때 일어나는 다음과 같은 표면 반응을 통한 *p*-형 CuO 박막 내부에서의 양공 생성에 의해 설명될 수 있다[24)]:

$$NO(gas) \rightarrow 1/2N_2(gas) + O_{ad}^{-} + h^{+}$$

여기서 O_{ad}^{-}는 감지체 표면에 흡착되는 산소 이온을 나타낸다. 이 반응 과정은 CuO의 원자가 띠(valence band)로부터의 전자 제거를 가리키고, 그래서 양공과 흡착 산소 종이 생성됨으로써 결과적으로 CuO 박막/ZnO 나노막대 *p-n* 이종접합의 에너지 띠 구조가 바뀌게 된다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 *p*-CuO 박막/*n*-ZnO 나노막대 이종접합 구조에 대해 이론적으로 예상되는 평형 에너지 띠 구조를 보여주는데, 여기서 CuO의 띠 간격(E_{g1})과 ZnO의 띠 간격(E_{g2})은 각각 1.36 eV와 3.37 eV이다. CuO/ZnO *p-n* 이종접합 구조의 전도 띠(conduction band) 옵셋(offset)과 원자가 띠 옵셋은 각각 ΔE_c와 ΔE_v로 표기되어 있다. 이제 *p*-CuO/*n*-ZnO 이종구조가 공기 중 NO 가스에 노출되었을 때, NO 가스 흡착 반응 동안 CuO 층의 원자가

띠의 전자들이 NO 가스에 포획되어 양공 농도가 증가하게 됨으로써 CuO 층의 페르미 에너지가 CuO 원자가 띠 끝머리에 더 가까이 이동하고, 그래서 결국 CuO/ZnO 이종접합의 전위 장벽(potential barrier)이 높아지게 된다. 이런 이유 때문에 *p*형 CuO 박막/*n*형 ZnO 나노막대 이종접합 구조체가 NO 가스에 노출되었을 때 순방향 다이오드 전류는 공기 중의 순방향 다이오드 전류에 대해 감소하게 되며, 그리고 NO 가스 농도가 증가함에 따라 순방향 다이오드 전류가 두드러지게 감소하게 된다.

일반적으로 이종접합 구조 가스 센서의 가스 감지 반응(response) *S*는 다음과 같은 공식을 이용하여 추산된다:

$$S = \Delta I/I_g = (I_a - I_g)/I_g$$

여기서 I_a와 I_g는 각각 건조 공기 환경과 건조 공기 중 NO 가스에 노출된 환경에서 일정한 순방향 전압(이 경우에는 2 V)에 대해서 얻어진 전류값이다. Fig. 6는 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 구조 가스 센서가 150 ºC에서 건조 공기 중 NO 가스에 노출되었을 때 NO 가스의 농도에 따른 감지 반응의 변화 추이를 보여준다. 여기서 얻어진 감지 반응의 값은 Fig. 4에 나타낸 것과 같은 *I-V* 특성 측정 결과와 위에서 서술한 공식을 사용하여 산정되었다. Fig. 6에서 가스 센서의 감지 반응이 NO 가스 농도가 증가함에 따라 일관되게 증가한다는 점을 분명히 알 수 있는데, 이런 선형적 비례 관계는 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 가스 센서의 경우에 흡착된 표면 산소 이온이 주로 O^-임을 시사한다.[25] 여기서 ZnO/CuO 산화물 이종접합의 NO 가스 감지 반응의 측정값은 150 ºC에서 10 ppm NO 가스에 대해 대략 1,000 %에 이를 만큼 높은 값을 갖는 것으로 밝혀졌는데, 이 값은 통상적인 CuO 박막 NO 가스 센서들의 측정값에 비해서 몇 배나 높은 값이다.[26] 또한, Fig. 6의 삽입 그림에서 분명히 볼 수 있듯이, ZnO/CuO 산화물 이종접합의 NO 가스 감지 반응이 작동 온도에도 의존하는 것으로 밝혀졌는데, 이 경우에 작동 온도 150 ºC에서 최대값을 나타낸다. 그런데 통상적인 산화물 반도체 NO 가스 센서의 최적 작동 온도가 대개 300 ºC에서 400 ºC 사이라는 점을 감안하면, CuO 박막/ZnO 나노막대 산화물 이종구조 NO 가스 센서의 최적 작동 온도가 150 ºC로 상당히 낮다는 점은 실용적인 측면에서 주목할 만하다. 이 결과는 p-CuO/n-ZnO 이종접합 구조 NO 가스 센서가 비교적 낮은 온도에서 NO 가스에 대한 높은 반응을 나타낼 수 있다다는 점을 시사한다. 한편, 작동 온도 150 ºC 이상에서 온도가 증가함에 따라 가스 감도가 감소하는 원인은 주로 온도 증가에 따른 이종접합 감지체의 열화로 인한 반응성, 즉 전류 변화의 감소로 여겨진다.[27]

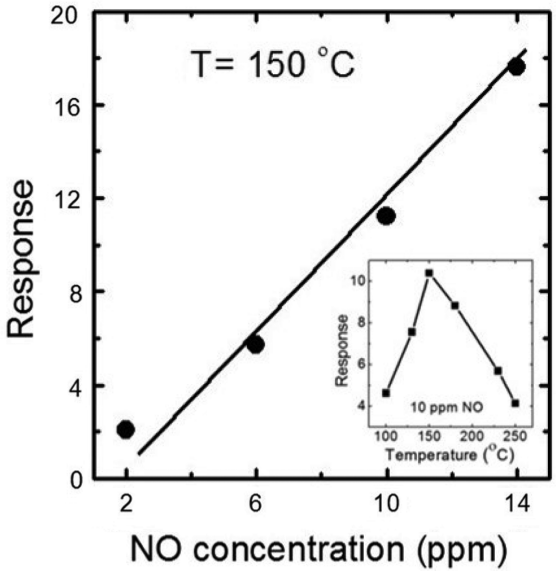

Fig. 6. Variation of the sensing response as a function of the NO gas concentration in dry air at 150 °C for the CuO thin film/ZnO nanorods heterostructure. The inset shows the variation of the NO gas sensing response as a function of the operating temperature.

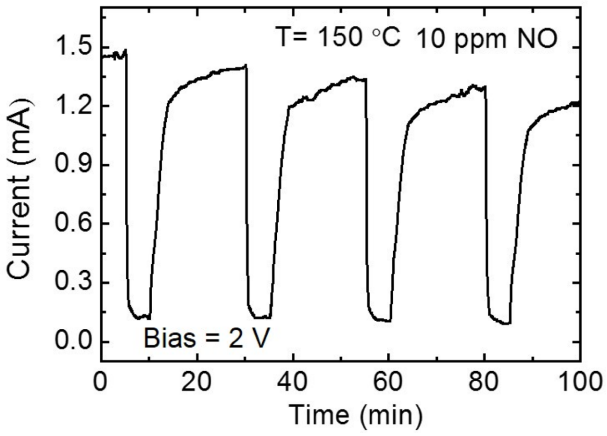

Fig. 7. Dynamic current response curves of the CuO thin film/ZnO nanorods heterojunction structure during periodical exposure to 10 ppm NO in dry air at 150 °C under an applied bias of 2 V.

Fig. 7은 작동 온도 150 ºC에서 건조 공기 중 10 ppm의 NO 가스에 주기적으로 노출되었을 때 CuO 박막/ZnO 나노막대 산화물 이종구조 NO 가스 센서가 나타내는 전형적인 반응 곡선을 보여준다. 이 반응 곡선은 2 V의 순방향 전압이 가해진 조건에서 측정되었다. 관측된 반응 곡선의 주목할 만한 가역적인 순환은 NO 가스 감지가 반복 가능하고 안정적으로 작동하고 있다는 것, 즉 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 NO 가스 센서가 재현성과 안정성을 갖추고 있다는 것을 명백히 가리킨다. 일반적으로 센서가 검출대상 가스에 노출되었을 때

포화 반응의 90 %에 도달하는 시간으로 규정되는 반응 시간은 대략 100초로서 비교적 짧은 것으로 추산되었다.

4. 결 론

수열합성법을 이용하여 합성된 *n*형 ZnO 나노막대 집합체 및 그 위에 스퍼터링법을 이용하여 형성된 *p*형 CuO 박막으로 이루어진 *p*-CuO 박막/*n*-ZnO 나노막대 산화물 반도체 이종접합 구조체의 전기적 수송 거동과 NO 가스 감지 특성을 체계적으로 조사하였다. 제작된 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 구조체는 상온에서 250 ºC에 이르기까지 다양한 온도에서 분명한 정류 특성을 나타내었다. 측정된 순방향 *I-V* 특성 곡선을 분석하면, CuO 박막/ZnO 나노로드 *p-n* 이종접합 구조체가 건조 공기 중에서 산화성 가스 NO에 노출되었을 때 순방향 다이오드 전류의 또렷한 감소가 관측되었다. 이 현상은 NO 가스 흡착에 따른 *p*-형 CuO 층 내부에서의 양공 농도 증가에서 기인하는 이종접합의 전위 장벽 증가에 의해 설명될 수 있다. 건조 공기 중 10 ppm의 NO 가스에 노출되었을 때 2 V의 순방향 전압에서 측정된 CuO 박막/ZnO 나노막대 이종접합 구조체의 NO 가스 감지 반응은 150 ºC라는 비교적 낮은 작동 온도에서 ~1,000 %에 이를 만큼 큰 값을 나타낸다는 것을 알게 되었다. 이런 가스 감지 특성의 향상은 수직으로 정렬된 ZnO 나노막대가 박막이나 정렬되지 않은 나노막대보다 유효 계면 면적을 증가시키기 때문에 효과적인 나르개 이동을 위한 직접적인 경로뿐 아니라 다양한 채널도 제공하는 데서 기인하는 것으로 이해될 수 있다. 결론적으로 이 연구는 CuO 박막/ZnO 나노막대 산화물 반도체 이종접합 구조체가 비교적 낮은 온도에서 작동하는 고성능 NO 가스 센서의 감지체로서 활용 가능하다는 점을 예증한다.

Acknowledgement

This work was supported by the 2016 Research Fund of Chungnam National University.

References

1. G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja and R. Bibions, Sensors, **10**, 5469 (2010).
2. N. Yamazoe and N. Miura, Sens. Actuators, B, **20**, 95 (1994).
3. S. Basu and A. Dutta, Sens. Actuators, B, **22**, 83 (1994).
4. Y. Xia, P. Yang, Y. Sun, Y. Wu, B. Mayers, B. Gates, Y. Yin, F. Kim and H. Yan, Adv. Mater., **15**, 353 (2003).
5. D. H. Zhang, C. Li, X. L. Liu, T. Tang and C. W. Zhou, Appl. Phys. Lett., **83**, 1845 (2003).
6. T. Gao and T. H. Wang, Appl. Phys. A, **80**, 1451 (2005).
7. N. L. Hung, E. Ahn, H. Jung, H. Kim and D. Kim, J. Korean Phys. Soc., **57**, 1784 (2010).
8. S. Park, H. Kim and D. Kim, J. Korean Phys. Soc., **66**, 31 (2015).
9. J. X. Wang, X. W. Sun, Y. Yang, H. Huang, Y. C. Lee, O. K. Tan and L. Vayssieres, Nanotechnology, **17**, 4995 (2006).
10. J. Y. Park, S.-W. Choi and S. S. Kim, Nanoscale Res. Lett., **5**, 353 (2010).
11. M.-S. Lee, E. Oh and S.-H. Jeong, Bull. Korean Chem. Soc., **32**, 3735 (2011).
12. R. Kumar, O. Al-Dossary, G. Kumar and A. Umar, Nano-Micro Lett., **7**, 97 (2015).
13. S.-D. Baek, P. Biswas, J.-W. Kim, Y. C. Kim, T. I. Lee and J.-M. Myoung, ACS Appl. Mater. Interfaces, **8**, 13018 (2016).
14. P. Biswas, S.-D. Baek, S. H. Lee, J.-H. Park, S. J. Lee, T. I. Lee and J.-M. Myoung, Sci. Rep., **5**, 17961 (2015).
15. C. M. Chen, S. J. Chang, S. P. Chang, M. J. Li, I. C. Chen, T. J. Hsueh and C. I. Hsu, Chem. Phys. Lett., **476**, 69 (2009).
16. S. Maridha and D. Basak, Semicond. Sci. Technol., **21**, 928 (2006).
17. J. M. Luther, J. Gao, M. T. Lloyd, O. E. Semonin, M. C. Barad and A. J. Nozik, Adv. Mater., **22**, 3704 (2010).
18. A. El-Trass, H. El-Shamy, I. El-Mehasseb and M. El-Kemary, Appl. Surf. Sci., **258**, 2997 (2012).
19. H. Kidowaki, T. Oku and T. Akiyama, J. Phys.: Conf. Ser., **352**, 012022 (2012).
20. L. T. Hoa and S. H. Hur, Phys. Stat. Sol. A, **210**, 1213, (2013).
21. H. Hwang and H. Kim, Korean J. Mater. Res., **26**, 84 (2016).
22. L. Liu, K. Hong, T. Hu and M. Xu, J. Alloys Compd., **511**, 195 (2012).
23. A. Chowdhury, B. Biswas, R. N. Bera and B. Malik, RSC Advances, **2**, 10968 (2012).
24. S. Choopun, N. Hongsith and E. Wongrat, Nanowires - Recent Advances, p. 8, ed. by X. Peng, InTech (2012).
25. S. C. Naisbitt, K. F. E. Pratt, D. E. Williams and I. P. Parkin, Sens. Actuators B, **114**, 969 (2006).
26. H. Hwang, H. Kim and D. Kim, Korean J. Mater. Res., **25**, 171 (2015).
27. H. Yoo, MS Thesis (in Korean), p. 76, Chungnam National University, Daejeon (2016).