

스핀코팅법으로 제작한 산화아연/산화구리 이종접합의 정류 및 일산화질소 가스 감지 특성

황현정¹ · 김효진^{1,2†}

¹충남대학교 차세대기판학과, ²충남대학교 공과대학 신소재공학과

Rectifying and Nitrogen Monoxide Gas Sensing Properties of a Spin-Coated ZnO/CuO Heterojunction

Hyeonjeong Hwang¹ and Hyojin Kim^{1,2†}

¹Graduate School of Advanced Circuit Substrate Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

(Received October 16, 2015 : Revised December 12, 2015 : Accepted January 8, 2016)

Abstract We present the rectifying and nitrogen monoxide (NO) gas sensing properties of an oxide semiconductor heterostructure composed of *n*-type zinc oxide (ZnO) and *p*-type copper oxide thin layers. A CuO thin layer was first formed on an indium-tin-oxide-coated glass substrate by sol-gel spin coating method using copper acetate monohydrate and diethanolamine as precursors; then, to form a *p-n* oxide heterostructure, a ZnO thin layer was spin-coated on the CuO layer using copper zinc dihydrate and diethanolamine. The crystalline structures and microstructures of the heterojunction materials were examined using X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The observed current-voltage characteristics of the *p-n* oxide heterostructure showed a non-linear diode-like rectifying behavior at various temperatures ranging from room temperature to 200 °C. When the spin-coated ZnO/CuO heterojunction was exposed to the acceptor gas NO in dry air, a significant increase in the forward diode current of the p-n junction was observed. It was found that the NO gas response of the ZnO/CuO heterostructure exhibited a maximum value at an operating temperature as low as 100 °C and increased gradually with increasing of the NO gas concentration up to 30 ppm. The experimental results indicate that the spin-coated ZnO/CuO heterojunction structure has significant potential applications for gas sensors and other oxide electronics.

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

1. 서 론

근자에 인류가 유발한 대기 오염 및 유독 가스의 돌발적 누출에 대한 우려가 커지면서 다양한 유해 가스를 효과적으로 검출할 수 있는 적절한 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 신경계에 치명적인 손상을 줄 뿐 아니라, 광화학적 스모그와 산성비의 원인이 되는 가

스로 알려져 있다. 이 중에서 일산화질소(NO) 가스는 유독한 이산화질소(NO₂) 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.

가스 센서는 주위 가스 환경으로부터 특정 가스의 존

[†]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.

재 여부와 농도 등의 정보를 제공하는 감지 소자를 일컫는데, 가스 센서의 핵심 요소인 가스 감지체는 검출하고자 하는 대상 가스에 선택적으로 민감하게 반응하는 소재를 선정함으로써 최적화된다. 지금까지 개발된 다양한 유형의 가스 센서들 가운데 가장 실용적인 가스 센서는 산화물 반도체(oxide semiconductor)를 감지체로 사용하는 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. 지금까지 이런 산화물 반도체들 가운데 3.37 eV의 넓은 밴드갭을 갖는 *n*-형 반도체인 산화아연(ZnO)이 유망한 감지체 소재로서 널리 연구되었는데, 왜냐하면 ZnO는 높은 화학적 안정성, 가공의 용이함 그리고 형태학적 다양성을 갖추고 있기 때문이다. ZnO계 가스 센서들은 단결정, 세라믹, 후막 및 박막을 비롯한 다양한 형태의 ZnO를 사용하여 제작되었지만, 이런 ZnO계 가스 센서들은 일반적으로 300 °C 이상의 비교적 높은 작동온도(operating temperature)가 필요하고 감도(sensitivity)도 꽤 낮은 편(대체적으로 50 % 이하)으로 알려져 있다.^{3,4)}

최근에 크기와 모양 등을 제어할 수 있는 ZnO 나노구조체 합성 기술이 개발됨으로써 가스 감지 특성을 향상시킬 수 있는 좋은 여건이 마련되었는데, 왜냐하면 ZnO 나노결정(nanocrystal), 나노선(nanowire), 나노막대(nanorod) 등을 활용하는 가스 센서는 가스 표면 반응의 유효면적을 넓힐 수 있기 때문이다.⁵⁾ 다른 한편으로는 비교적 높은 효율성과 감도 덕분에 다른 산화물 반도체들과 결합된 ZnO 기반 *p-n* 이중접합 구조체들이 태양전지, 광검출기 그리고 가스 센서 같은 다양한 전자 소자, 광전 소자 그리고 전기화학 소자의 핵심적인 기술로 간주된다.⁶⁻⁸⁾ 이 논문에서는 ZnO와 결합하여 산화물 이중접합 구조체를 형성할 수 있는 *p*-형 산화물 반도체로서 CuO를 선택하였다. 단사결정 구조를 갖는 CuO는 비교적 좁은 1.5-1.8 eV의 밴드갭(band gap)을 나타내고, 저렴한 공정 비용과 양호한 전기적 및 광학적 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다.⁹⁾ 근자에 ZnO와 CuO를 활용한 *p-n* 이중접합 구조체들이 태양전지와 가스 센서용으로 제작되었다.^{10,11)} 본 논문에서는 스펀코팅법을 이용하여 산화인듐주석(ITO)이 코팅된 유리 기판 위에 산화물 반도체 ZnO/CuO 이중접합 구조체를 제작하였다. 제작된 ZnO/CuO 이중접합 구조체의 정류 및 일산화가스 감지 특성을 체계적으로 조사하였다. 여기서 우리는 산화물 반도체 ZnO/CuO 이중접합 구조체가 낮은 비용, 높은 성능의 일산화질소 가스 센서용 감지체로써 유망하다는 점을 제시할 것이다.

2. 실험 방법

먼저 스펀코팅법을 사용하여 ITO가 코팅된 유리 기판 위에 CuO 박막을 성장시켰다. CuO 스펀코팅용 용액은 아세트산 구리 수화물[Cu(CH₃CO₂)₂·H₂O]를 2-메톡시에탄올(2-methoxyethanol)과 모노에탄올아민(monoethanolamine)을 혼합한 용매에 0.5 M의 몰 비율을 갖도록 제조하였다. 이 용액을 70 °C에서 1시간 동안 자기 교반자를 사용하여 균일하게 혼합하였다. ITO가 코팅된 유리 기판을 스펀코팅기의 척 위에 고정하고 교반된 용액을 떨어뜨려 15초 동안 1,500 rpm의 속도로 회전시킨 후에 30초 동안 3,000 rpm의 속도로 회전시켜 스펀코팅을 수행하였다. 건조한 공기 분위기에서 코팅된 기판을 300 °C에서 10분 동안 건조시켰다. 전극 표면 부분을 노출시키기 위해 용제를 사용하여 코팅된 부분을 제거하였다. 알맞은 두께의 CuO 박막을 얻기 위해 같은 과정을 5회 반복하였다. 마지막으로 스펀코팅된 박막에 대해 건조한 공기 분위기에서 열처리 공정을 550 °C에서 1시간 동안 진행하였다.

산화물 반도체 이중접합을 형성하기 위해 사전에 코팅된 CuO 박막 위에 ZnO 박막을 스펀코팅법을 사용하여 성장시켰다. ZnO 스펀코팅용 용액은 아세트산 아연 수화물[Zn(CH₃CO₂)₂·2H₂O]를 2-메톡시에탄올과 모노에탄올아민을 혼합한 용매에 0.5 M의 몰 비율을 갖도록 제조하였다. 이 용액을 70 °C에서 1시간 동안 자기 교반자를 사용하여 균일하게 혼합하였다. CuO가 코팅된 기판을 30초 동안 3,000 rpm의 속도로 회전시켜 스펀코팅을 수행한 후에 건조한 산소 분위기에서 300 °C에서 10분 동안 건조 공정을 진행하였으며, 용제를 사용하여 전극 표면 부분을 노출시켰다. 동일한 과정을 3회 반복한 후에 얻어진 ZnO/CuO 이중접합 구조체에 대한 열처리 공정을 1,500 Torr의 공기 분위기와 550 °C에서 1시간 동안 진행하였다.

제작된 ZnO/CuO 산화물 반도체 이중접합의 결정상을 알아보기 위해 X선 회절 분석기(XRD)를 사용하였으며, 미세구조 분석을 위해 냉전계형 장방출 주사전자현미경(SEM)를 이용하였다. 이중접합 구조체의 전기적 특성 및 NO 가스 감지 특성을 조사하기 위해 0.5 × 0.5 cm²의 면적을 갖는 두 개의 사각형 Ag 접촉을 ZnO와 ITO 표면 위에 형성하였다. 건조한 공기 중에서 그리고 NO 가스에 노출된 상태에서 이중접합의 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 10 ppm에서 30 ppm까지 변

화시켰으며, 센서의 작동온도는 상온에서 200 °C까지 정확하게 조절하였다.

3. 결과 및 고찰

ITO가 코팅된 유리 기판 위에 스펀코팅법을 이용하여 형성된 ZnO/CuO 산화물 반도체 이종접합에 대해 관측된 전형적인 XRD 패턴을 Fig. 1(a)에 나타내었다. 이 그림에 표시한 것처럼, ITO 층에서 비롯된 회절선들을 제외하면, 관측된 회절선들은 육방정계 우르짜이트(hexagonal wurtzite) ZnO 결정상 또는 단사정계 테노라이트(monoclinic tenorite) CuO 결정상에서 비롯된 것으로 분석되었다. 여타의 이차상은 전혀 검출되지 않았으며, ZnO 및 CuO는 다결정질로 성장하였음을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 제작된 ZnO/CuO 이종접합의 단면 SEM 영상을 보여주는데, 확연히 구별되는 ITO 층의 표면 위에 각각 230 nm와 262 nm의 두께를 갖는 CuO 층과 ZnO 층이

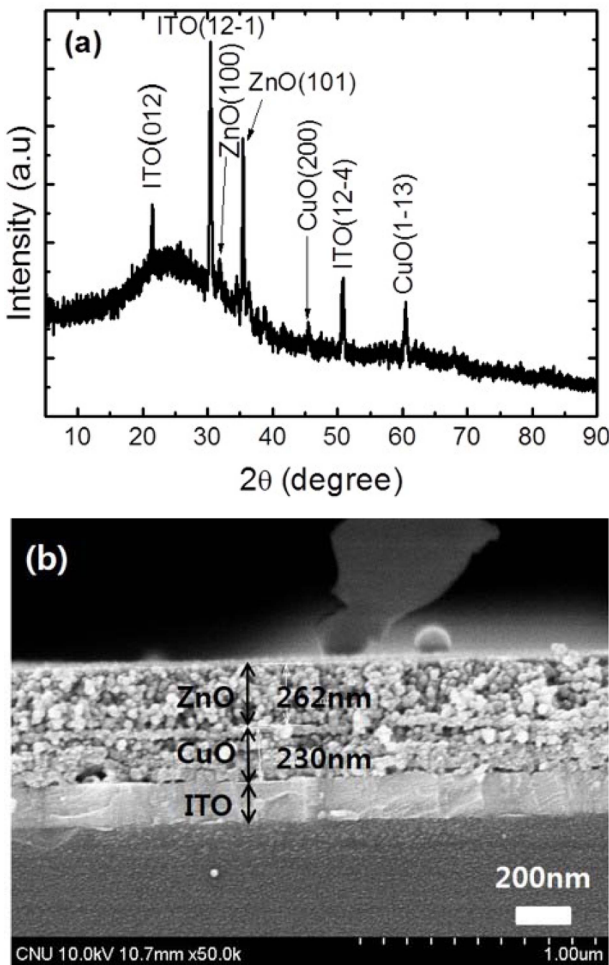


Fig. 1. (a) X-ray diffraction pattern and (b) cross-sectional SEM image of the spin-coated ZnO/CuO heterostructure on an ITO-coated glass substrate.

매우 촘촘하고 균일하게 코팅된 것을 확인할 수 있으며, 그리고 CuO 층과 ZnO 층 사이에 계면이 비교적 또렷하게 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

산화물 반도체 ZnO/CuO 이종접합 구조체의 전류-전압(*I-V*) 특성을 건조한 공기 중에서 온도를 상온에서 200 °C까지 변화시켜 가면서 측정한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 Fig. 2의 삽입그림은 산화물 반도체 이종구조의 도식적 회로도도를 보여준다. Fig. 2에 나타낸 모든 *I-V* 곡선들은 다이오드의 정류 특성 거동을 분명히 보여주는데, 이것은 전형적인 반도체 *p-n* 접합이 형성되었음을 가리킨다. 온도가 올라감에 따라 산화물 *p-n* 이종접합의 턴온 전압(turn-on voltage)는 점진적으로 감소하는 한편으로 순방향 전류(forward current)는 또렷하게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 반도체 물질에 대해 예상되는 결과이다. 이 현상은 산화물 이종구조에 있어서 온도 상승에 따라 전위 장벽(potential barrier)의 높이 감소와 공핍 영역(depletion region)의 너비 축소에서 기인하는 것으로 여겨진다.

일반적으로 *p-n* 접합의 순방향 *I-V* 특성 곡선은 다음과 같은 표준식으로 서술된다:

$$I = I_0 [\exp(qV/\eta kT) - 1]$$

여기서 *q*는 전자 전하, η 는 다이오드의 이상 계수(ideality factor), *k*는 볼츠만 상수 그리고 *T*는 절대 온도이다.¹²⁾ 이상 계수 η 의 값은 다이오드가 이상적인 *p-n* 접합에서 벗어난 정도를 서술하는데, 측정된 데이터를

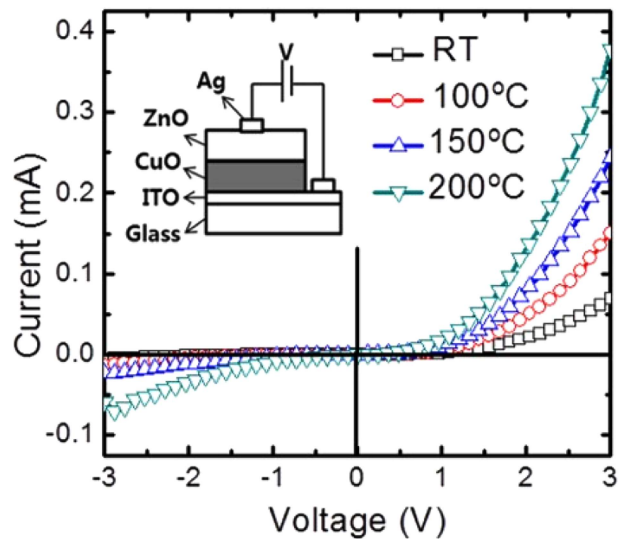


Fig. 2. Current-voltage(*I-V*) characteristic curves of the spin-coated ZnO/CuO heterostructure in dry air at several temperatures from room temperature(RT) to 200 °C. The inset shows a schematic circuit of the ZnO/CuO heterostructure device.

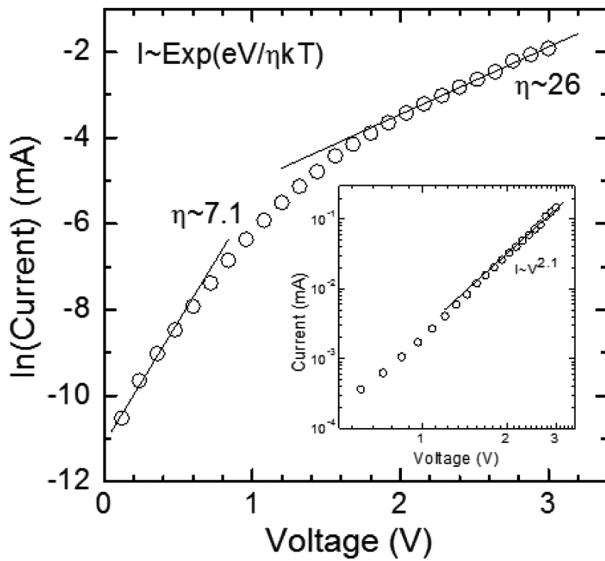


Fig. 3. The $\ln(I)$ - V plot for the spin-coated ZnO/CuO heterostructure in dry air under forward bias at room temperature. The inset shows the log-log plot for the I - V data.

사용하여 다음과 같은 식으로 도출될 수 있다:

$$\eta = (q/kT)(d \ln I / dV)^{-1}$$

사-노이스-쇼클리(Sah-Noyce-Schockley) 이론에 따르면 η 는 전형적으로 1(확산 전류가 지배적일 때)과 2(재결합 전류가 지배적일 때) 사이의 값을 갖는다.¹³⁾ 상온에서 순방향 바이어스 하에서 관측된 $\ln(I)$ - V 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 관측된 $\ln(I)$ - V 곡선을 선형으로 피팅함으로써 저전압 바이어스 영역(< 0.5 V)에서는 $\eta = 7.1$, 고전압 바이어스 영역(> 1.5 V)에서는 $\eta = 26$ 을 각각 얻게 된다. 이상 계수에 대해 얻어진 값들은 이상적인 p - n 접합의 값보다 이례적으로 더 크다는 것을 알 수 있다. 특히 고전압 바이어스 영역에서 $\eta = 26$ 이라는 추산된 값은 표준적인 지수함수적 관계로 피팅하기에는 너무 크다. Fig. 3의 삽입그림에서 볼 수 있듯이, log-log 척도로 나타낸 I - V 특성 곡선은 고전압 바이어스 영역에서 $I \sim V^{2.1}$ 이라는 관계식을 갖는다. 비슷한 현상이 다양한 반도체 이종접합 구조체들에서 관측되었으며, 그런 현상의 원인은 전류 밀도 J 가 다음과 같은 관계식으로 서술되는 공간 전하 한정적(space-charge-limited) 전류 전도에 귀속된다:

$$J = (9/8)\epsilon\mu V^2/d^3$$

여기서 d 는 활성 영역(active region)의 두께이다.^{14,15)} 저전압 바이어스 영역에서는 공간 전하 영역(space charge region, SCR)으로 들어온 양공과 전자들이 SCR에서 재결합하게 되고, 그래서 전하 중성을 유지한다. 반면에 고

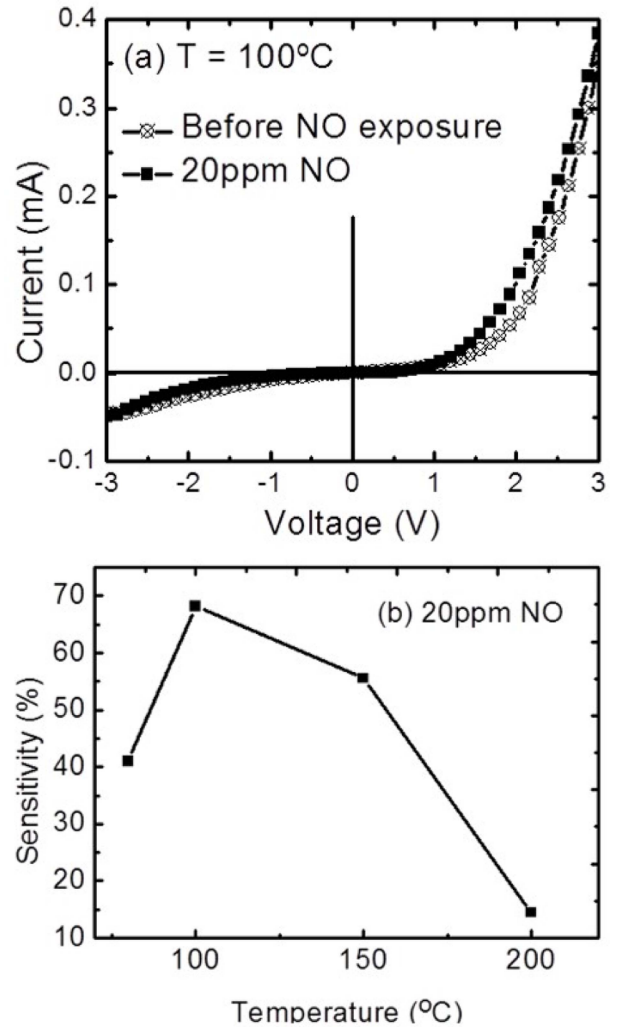
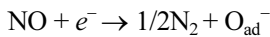


Fig. 4. (a) Current-voltage(I - V) characteristic curves of the spin-coated ZnO/CuO heterostructure in dry air and upon exposure to 20 ppm NO gas in dry air at 100 °C. (b) Variation in the sensitivity as a function of the operating temperature for the spin-coated ZnO/CuO heterostructure exposed to 20 ppm NO gas in dry air.

전압 바이어스 영역에서는 양공들이 SCR을 횡단하여 ZnO 층의 주요 전자들과 재결합할 것이다. ZnO의 모든 전자들이 고갈되면, 접합 콘덕턴스(conductance)는 고체 부도체의 콘덕턴스와 유사할 수 있을 것이고, 그래서 전류는 공간 전하 한정적인 것이 된다. 공간 전하 한정적 특질과 크기는 나르개 트랩 상태들의 밀도, 위치 그리고 포획 단면적에 의존하는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ ZnO/CuO 이종접합 구조의 수송 특성들을 결정하는 데 있어서 이런 인자들의 역할을 이해하기 위해서는 후속 연구가 필요하다.

스핀코팅된 ZnO/CuO 산화물 반도체 이종접합 구조의 NO 가스 감지 특성을 여러 작동 온도에 대해서 건조한 공기 중 NO 가스 농도를 다양하게 변화시키면서 측정

하였다. Fig. 4(a)는 100 °C의 온도에서 ZnO/CuO 이종접합 구조에 대해 건조 공기 중에서 측정된 I - V 특성 곡선과 건조 공기 중 농도가 20 ppm인 NO 가스에 노출되었을 때의 I - V 특성 곡선을 보여준다. 여기서 전자를 포획하는 산화성 가스인 NO 가스에 노출되었을 때, 산화물 반도체 ZnO/CuO 이종접합 구조의 순방향 전류가 증가하는 것을 분명히 볼 수 있다. ZnO/CuO 이종접합 NO 가스 센서 구조에서 관측되는 전류 증가 현상은 ZnO 단일 층으로 이루어진 NO 가스 센서에서 관측되는 전류 감소 현상과 대조를 이루는데, 이것은 다음과 같이 설명될 수 있다. 먼저 NO 가스는 ZnO층 표면에서 다음과 같은 흡착 반응을 통해서 n 형 ZnO층으로부터 전자를 포획한다¹⁶⁾:



여기서 O_{ad}^- 는 감지체 표면에 흡착되는 산소 이온을 나타낸다. 따라서 ZnO/CuO 이종구조가 공기 중 NO 가스에 노출되었을 때, NO 가스 흡착 반응 동안 ZnO층의 전도 띠(conduction band)의 자유전자들이 NO 가스에 포획되어 전자 농도가 감소하게 됨으로써 ZnO층의 페르미 에너지가 사실상 낮아지고, 그래서 결국 ZnO/CuO 이종접합의 전위 장벽(potential barrier)이 줄어들게 된다. 이런 이유 때문에 ZnO/CuO 이종접합이 NO 가스에 노출되었을 때의 순방향 다이오드 전류는 공기 중의 순방향 다이오드 전류에 대해 증가하게 된다. 100 °C 외의 다른 측정 온도에서도 ZnO/CuO 이종접합 구조가 NO 가스에 노출되었을 때 I - V 특성 곡선의 변화 양상이 유사한 것으로 관측되었다.

일반적으로 이종접합 구조 가스 센서의 가스 감도(sensitivity) S 는 다음과 같은 공식을 이용하여 추산된다:

$$S(\%) = \Delta I/I_a \times 100 = (I_g - I_a)/I_a \times 100$$

여기서 I_a 와 I_g 는 각각 건조 공기 환경과 건조 공기 중 NO 가스에 노출된 환경에서 일정한 순방향 전압(이 경우에는 2 V)에 대해서 얻어진 전류값이다. Fig. 4(b)는 ZnO/CuO 이종접합 구조 가스 센서가 건조 공기 중 20 ppm의 NO 가스에 노출되었을 때 작동 온도에 따른 감도 변화를 보여준다. 여기서 얻어진 감도의 값은 Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같은 I - V 특성 측정 결과와 위에서 서술한 공식을 사용하여 산정되었다. ZnO/CuO 산화물 이종접합의 NO 가스 감도는 작동 온도에 두드러지게 의존한다. 측정된 감도의 값은 100 °C에서 대략 69%에 이르는 최대값을 나타내었는데, 이 값은 나노막대, 나노선 등으로 구성된 산화물 반도체 나노구조 가스 센서의 감

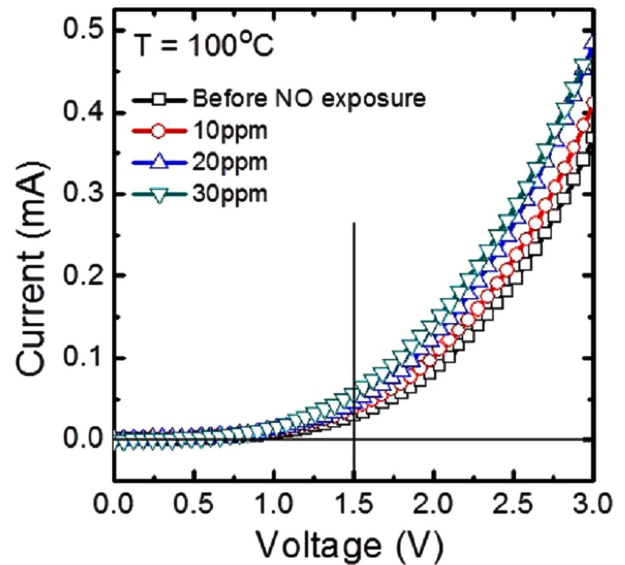


Fig. 5. Current-voltage (I - V) characteristic curves of the spin-coated ZnO/CuO heterostructure for several NO gas concentration in dry air at 100 °C.

도에 비해서는 비교적 작은 편이다.¹⁷⁾ 그런데, ZnO 같은 통상적인 n 형 산화물 반도체 NO 가스 센서의 최적 작동 온도가 대개 300 °C에서 400 °C 사이라는 점을 감안하면, ZnO/CuO 산화물 이종접합 구조 NO 가스 센서의 최적 작동 온도가 100 °C로 상당히 낮다는 점은 실용적인 측면에서 주목할 만하다. 이 결과는 ZnO/CuO 이종접합 구조 NO 가스 센서가 비교적 낮은 온도에서 NO 가스에 대한 높은 감도를 갖는다는 점을 시사한다. 한편, 작동 온도 100 °C 이상에서 온도가 증가함에 따라 가스 감도가 감소하는 원인은 주로 온도 증가에 따른 이종접합 감지체의 열화로 인한 반응성, 즉 전류 변화의 감소로 여겨진다.

ZnO/CuO 산화물 이종접합 구조체의 I - V 특성에 미치는 NO 가스 농도의 영향도 조사하였다. Fig. 5는 최적 작동 온도로 확인된 100 °C에서 건조 공기 중 가스 농도가 10 ppm에서 300 ppm인 NO 가스에 노출되었을 때 관찰된 I - V 특성 곡선의 추이를 보여주는데, 조사한 NO 가스 농도 범위에서는 정류 특성을 나타낸다는 점을 확인할 수 있다. 또한 가스 센서의 감도가 NO 가스 농도가 증가함에 따라 일관되게 증가한다는 점을 분명히 알 수 있는데, 이런 선형적 비례 관계는 ZnO/CuO 이종접합 가스 센서의 경우에 흡착된 표면 산소 이온이 주로 O^- 임을 시사한다.¹⁸⁾

산화물 반도체 가스 센서의 가스 감지 특성은 주로 감지체 표면에서 일어나는 흡착 산소와 검출 대상 가스 사이의 표면 반응의 종류와 세기에 달려 있다. 표면 반응은 열적으로 활성화되는 과정이기 때문에 반응 속도는

표면 반응이 일어나는 감지체의 단위 부피당 유효 표면의 넓이와 표면 반응의 활성화 에너지 크기에 의존한다. 따라서 감지체의 미세구조의 기하학적 열개와 촉매 금속 원소가 가스 센서의 특성에 큰 영향을 미친다.¹⁹⁾ 여기서, ZnO/CuO 이종접합 구조 가스 센서의 감도가 여타의 산화물 반도체 나노구조 가스 센서들에 비해 비교적 낮은 이유는 박막 형태의 구조가 다른 나노막대 구조보다 비교적 낮은 유효 표면 반응 면적을 가졌기 때문으로 추정된다. 그런데 ZnO/CuO 이종접합 구조 NO 가스 센서의 최적 작동 온도가 100 °C 정도로 상당히 낮은 장점은 이종접합 구조에서 기인하는 표면 반응의 활성화 에너지의 크기의 감소와 관련이 있다고 추정된다. 물론 가스의 감지 특성은 표면 반응 면적 외에 결정성과 다른 표면 특성에 의존하기도 하는데, 이런 효과에 대해서는 더 연구할 필요가 있다.

4. 결 론

스핀코팅법을 이용하여 제작된 *n*형 산화물 반도체 ZnO와 *p*형 산화물 반도체 CuO로 이루어진 ZnO/CuO 이종접합 구조체의 전기적 수송 거동과 일산화질소 가스 감지 특성을 체계적으로 조사하였다. 제작된 ZnO/CuO 이종접합 구조체는 상온에서 200 °C에 이르기까지 다양한 온도에서 명확한 정류 특성을 나타내었다. 측정된 순방향 *I-V* 특성 곡선을 분석하면, 고전압 순방향 바이어스 조건에서 전기적 전도는 공간 전하 한정적(SCL)인 거동을 나타내며 $I \sim V^{2.1}$ 이라는 관계식을 따른다. 산화물 ZnO/CuO 이종접합 구조체가 건조 공기 중에서 산화성 가스 NO에 노출되었을 때, ZnO/CuO 이종접합의 순방향 다이오드 전류의 뚜렷한 증가가 관측되었다. 이 현상은 NO 가스 흡착에 따른 *n*-형 ZnO 층 내부에서의 전자 농도 감소에서 기인하는 이종접합의 전위 장벽 강하에 의해 설명될 수 있다. 건조 공기 중 20 ppm의 NO 가스에 노출되었을 때 2 V의 순방향 전압에서 측정된 ZnO/CuO 이종접합 구조체의 NO 가스 감도는 100 °C라는 상당히 낮은 작동 온도에서 69%에 이르는 최대값을 나타낸다는 것을 알게 되었다. 결론적으로 이 연구는 스펀코팅법으로 제작된 ZnO/CuO 산화물 반도체 이종접합 구조체가 비교적 낮은 온도에서 작동하는 NO 가스 센서의 감지체로서 활용 가능하다는 점을 예증한다.

Acknowledgement

This work was supported by the 2014 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. Y. Min, H. L. Tuller, S. Palzer, J. Wollenstein and H. Bottner, *Sens. Actuators B*, **93**, 435 (2003).
4. T. Gao and T. H. Wang, *Appl. Phys. A*, **80**, 1451 (2005).
5. S. Baruah and J. Dutta, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **10**, 013001 (2009).
6. 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).
7. S. Maridha and D. Basak, *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, 928 (2006).
8. J. M. Luther, J. Gao, M. T. Lloyd, O. E. Semonin, M. C. Barad and A. J. Nozik, *Adv. Mater.*, **22**, 3704 (2010).
9. A. El-Trass, H. El-Shamy, I. El-Mehasseb and M. El-Kemary, *Appl. Surf. Sci.*, **258**, 2997 (2012).
10. H. Kidowaki, T. Oku and T. Akiyama, *J. Phys. Conf. Ser.*, **352**, 012022 (2012).
11. L. T. Hoa and S. H. Hur, *Phys. Stat. Sol. A*, **210**, 1213, (2013).
12. S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed., Wiley, New York (2007), p. 790.
13. C. Sah, R. N. Noyce and W. Shockley, *Proc. IRE*, **45**, 1228 (1957).
14. X. D. Chen, C. C. Ling, S. Fung, C. D. Beling, Y. F. Mai, R. K. Y. Fu, G. C. Siu and P. K. Chu, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 132104 (2006).
15. Z. Luo, J. H. Hao and J. Gao, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 062105 (2007).
16. R. W. J. Scott, S. M. Yang, G. Chabanis, N. Coombs, D. E. Williams and G. A. Ozin, *Adv. Mater.*, **13**, 1468 (2001).
17. S. J. Park, H. Kim and D. Kim, *Korean J. Mater. Res.*, **24**, 19 (2014).
18. S. C. Naisbitt, K. F. E. Pratt, D. E. Williams and I. P. Parkin, *Sens. Actuators B*, **114**, 969 (2006).
19. S. Ahlers, G. Muller and Th. Doll, *Encyclopedia of Sensors*, p. 413, ed. by C. A. Grimes, E. C. Dickey and M. V. Pishko, American Scientific Publishers (2006).