

ZnO가 첨가된 TeO₂ 나노와이어의 합성 및 저농도(50 ppm) 이산화질소 가스 센싱 특성

유동재 · 신가윤 · 엄완식 · 강석우 · 김은비 · 김형민 · 김현우[†]
한양대학교 신소재공학부

Synthesis and Low-concentration (50 ppm) NO₂ Sensing Properties of Bare and ZnO (n) Decorated TeO₂ (p) Nanowires

Dong Jae Yu, Ka Yoon Shin, Wansik Oum, Suk Woo Kang, Eun Bi Kim,
Hyeong Min Kim, and Hyoun Woo Kim[†]

Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

(Received September 6, 2022 : Revised October 11, 2022 : Accepted October 11, 2022)

Abstract We report the synthesis and gas sensing properties of bare and ZnO decorated TeO₂ nanowires (NWs). A catalyst assisted-vapor-liquid-solid (VLS) growth method was used to synthesize TeO₂ NWs and ZnO decoration was performed using an Au-catalyst assisted-VLS growth method followed by a subsequent heat treatment. Structural and morphological analyses using X-ray diffraction (XRD) and scanning/transmission electron microscopies, respectively, demonstrated the formation of bare and ZnO decorated TeO₂ NWs with desired phase and morphology. NO₂ gas sensing studies were performed at different temperatures ranging from 50 to 400 °C towards 50 ppm NO₂ gas. The results obtained showed that both sensors had their best optimal sensing temperature at 350 °C, while ZnO decorated TeO₂ NWs sensor showed much better sensitivity towards NO₂ relative to a bare TeO₂ NWs gas sensor. The reason for the enhanced sensing performance of the ZnO decorated TeO₂ NWs sensor was attributed to the formation of ZnO (n)/ TeO₂ (p) heterojunctions and the high intrinsic gas sensing properties of ZnO.

Key words TeO₂, ZnO, NO₂, gas sensor, sensing mechanism.

1. 서 론

1차원 나노물질은 넓은 표면적과 우수한 물리/화학적 특성, 좋은 결정성 등 다양한 특성을 가지고 있다.^{1,2)} 최근 몇 년 동안 나노튜브,³⁾ 나노섬유,⁴⁾ 나노벨트,⁵⁾ 나노와이어⁶⁾와 같은 1차원 나노물질 합성에 많은 관심이 집중되고 있다. 특히, 가스 센서 분야에서 넓은 표면적은 타겟 가스의 많은 흡착을 유발하기 때문에 중요하게 여겨지고 있다.⁷⁾ 다양한 가스 센서 중 금속 산화물 기반의 가스 센서는 높은 감도, 빠른 동작 특성, 간단한 제조 및 간편성 등으로 인해 가장 일반적으로 사용되고 있다.^{8,9)} 센싱 연구에서 금속 산화물 나노와이어(NWs)는 다

양한 방법으로 합성할 수 있는 1D 재료의 가장 중요한 카테고리 중 하나이다. 지금까지 나노와이어 형태를 가지는 많은 반도체 재료가 가스 센싱 목적으로 사용되었으며, 센싱 물질은 일반적으로 n-type과 p-type으로 나눌 수 있다.^{11,12)} 그러나 n-type 금속 산화물 반도체의 감지 특성이 p-type에 비해 훨씬 우수하기 때문에 n-type 금속 산화물에 대한 관심이 높다.¹³⁾

p-type 반도체 물질인 TeO₂는 우수한 광학적, 전기적 특성을 가지고 있기 때문에 가스 센싱 물질로 많이 연구되었다.¹⁴⁻¹⁹⁾ 그러나 TeO₂ 그 자체로는 센싱 능력이 떨어지기 때문에 다른 전략을 통해 감도를 개선해야 한다.²⁰⁾ 또한 다른 금속 산화물에 비해 1D 형태의 TeO₂ 합성이

[†]Corresponding author

E-Mail : hyounwoo@hanyang.ac.kr (H. W. Kim, Hanyang 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.

어렵기 때문에 TeO_2 에 대한 관심이 적었다. 그에 비해 ZnO는 대표적인 n-type 반도체 물질로, 3.37 eV의 넓은 밴드갭, 큰 결합에너지(60 meV), 높은 전자 이동도, 우수한 화학적/열적 안정성을 가지고 있다.^{21,22)}

금속 산화물의 감지 능력을 개선하기 위해 귀금속 증착, p-n 이종접합과 같은 방법이 연구되었다.^{23,24)} p-n 이종접합에서 전자는 n-type에서 p-type으로 이동하고, 그에 따라 n-type과 p-type 물질 표면에서 전자와 정공의 농도를 변화시킨다. 따라서 타겟 가스에 노출되면 계면 저항이 크게 변하면서 가스 센서의 저항 값이 변하게 된다.²⁵⁾ 본 연구에서는 p-(TeO_2)/n-(ZnO) 이종접합을 형성하기 위해 ZnO 나노입자가 장식된 TeO_2 NWs를 합성했고, NO_2 가스에 대한 감지 성능을 평가하였다. NO_2 는 유독하고 위험한 가스 중 하나로, 오존층 파괴, 산성비, 후각 마비, 급성 호흡기 질환 등의 건강 문제를 유발한다. 특히 최근 몇 년 동안 교통량과 건축물의 증가로 인해 대기 중 NO_2 가스 농도가 크게 증가하였다. 이는 NO_2 가스의 감지가 매우 중요하다는 것을 시사한다.²⁶⁾

본 연구에서는 Vapor-Liquid-Solid (VLS) 공법을 사용하여 순수 TeO_2 NWs와 ZnO 나노입자로 장식된 TeO_2 NWs를 합성하였다. 합성된 물질의 형태와 성분을 분석한 후, 가스 감지 특성을 연구하였다. ZnO 장식에 의한 TeO_2 NWs의 감지 성능이 향상되었음을 확인했다. 때문에 ZnO 장식에 따른 p-n 이종접합은 센서의 감도 향상에 영향을 미치는 주 요인이라고 할 수 있다.

2. 실험 방법

2.1. TeO_2 NWs 합성

TeO_2 NWs는 Au 촉매를 사용한 VLS 성장 공법을 통해 합성되었다. 먼저 TeO_2 NWs의 성장을 위해 Au 촉매를 스퍼터링 방법으로 알루미늄 기판에 3 nm 두께로 증착하였다. TeO_2 NWs의 성장을 위해 고순도의 Te 분말(> 99.9%, Sigma-Aldrich Co. Ltd.)이 사용되었다. TeO_2 NWs는 대기분위기에서 1시간동안 370 °C의 수직로에서 합성되었으며, 상온으로 냉각 후 사용하였다. Fig. 1(a)에 VLS 공법을 개략적으로 나타내었다.

2.2. ZnO 장식된 TeO_2 NWs 합성

TeO_2 NWs 표면에 ZnO 나노입자를 성장시키기 위해 TeO_2 NWs 표면을 스퍼터링 하여 3 nm 두께의 Au 층으로 코팅하였다. 그 뒤 550 °C에서 1시간 동안 성장을 시키면 TeO_2 NWs 표면에 ZnO 나노입자가 형성된다.

2.3. 특성 분석

합성된 TeO_2 NWs의 결정구조는 X선 회절 [XRD-Philips X'pert diffractometer, Cu K α 1 radiation ($\lambda = 1.5408 \text{ \AA}$)]을 사용하여 분석하였고 형태는 주사전자현미경(SEM Hitachi S-4200)과 투과전자현미경(TEM, JEOL JEM-2010, Japan, 200 kv)을 사용하여 분석하였다.

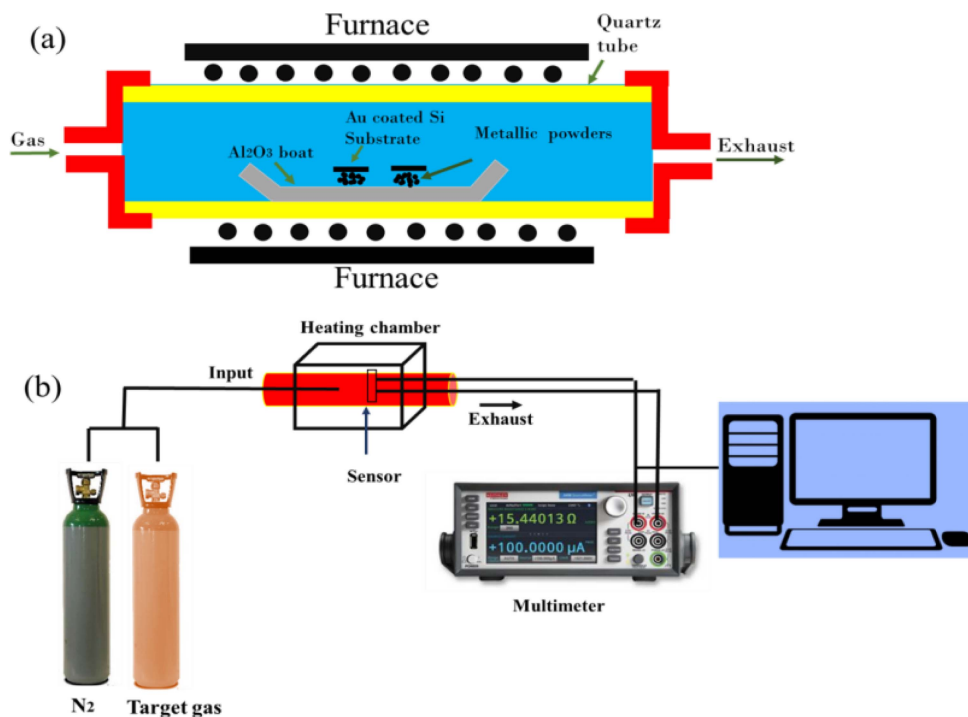


Fig. 1. Schematic representation of (a) VLS growth method, (b) sensing measurement.

2.3. 센서 제작 및 센싱 테스트

가스 센서 디바이스의 제작을 위해 알루미늄 기판위에 Au층(두께 300 nm)과 Ti층(두께 50 nm)을 순차적으로 증착하였다. 전극이 맞물리는 부분에 센싱 물질을 도포한 뒤, 제작된 센서를 센싱 장비에 넣고 NO₂ 가스와 건조된 공기의 혼합 비율을 변경하면서 가스 센싱 능력을 평가하였다. 센서의 저항 데이터는 Keithley 2400 source meter를 사용하여 측정되었고, 감도(R)는 $R = R_a/R_g$ (ZnO가 장식된 TeO₂ NWs의 경우)로 계산되었다. 여기서 R_a 및 R_g는 각각 건조된 공기에서의 저항, 타겟 가스가 혼합된 상태에서의 저항 값을 나타낸다.²⁷⁻³⁰ Fig. 1(b)에 센서 측정 시스템의 모식도를 나타내었다. 센서 측정은 수평로에서 측정되었고, 수평로 양쪽에 가스통과 멀티미터를 각각 연결시켜 타겟 가스의 농도에 따른 센서의 저항 변화 값을 실시간으로 모니터링 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 구조 및 형태 분석

Fig. 2에 합성된 TeO₂ NWs XRD 패턴을 나타내었다. Fig. 2(a)는 사방정계인 TeO₂ NWs의 XRD 패턴을 보여준다(JCPDS Card No. 52-1005).³¹ TeO₂ NWs의 기판으로 사용된 알루미늄(Al₂O₃)와 관련된 피크도 나타난 것을 확인할 수 있다. ZnO가 장식된 TeO₂ NWs의 경우, TeO₂ NWs에 대한 피크가 대부분 사라지고 ZnO와 관련된 피크가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이것은 TeO₂ 표면에 ZnO가 존재함을 확인시켜준다. 기판 물질(Al₂O₃)을 제외하고는 다른 물질에 대한 피크가 검출되지 않았으며, 이는 합성이 성공적으로 이루어졌음을 증명한다.

1D 금속 산화물을 성장시키기 위한 VLS 공법은 금속 물질과 촉매를 포함하는 액체 방울의 형성으로 설명할 수 있다. 산소가 흐르면서 액체 방울로부터 1D 금속 산화물이 형성된다.³³ 합성된 NWs가 성공적으로 형성되었는지 확인하기 위해 현미경 분석을 진행하였다. Fig. 3(a)는 길고 연속적인 TeO₂ NWs의 형태를 명확하게 보여주는 SEM 이미지이며, Fig. 3(b)는 ZnO로 장식된 TeO₂ NWs의 SEM 이미지이다. SEM 이미지를 통해 합성된 TeO₂ NWs의 직경이 90 nm인 것을 확인하였다. 또한 TEM을 사용하여 추가적인 분석을 진행하였으며, Fig. 3(c)에서 ZnO 장식에 의해 TeO₂ NWs의 표면이 거칠어진 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 가스 센싱 연구

Fig. 4(a)는 50 ~ 400 °C 온도 범위에서 50 ppm의 NO₂ 가스에 노출된 TeO₂ NWs의 감도 그래프를 나타낸다. TeO₂ NWs가 p-type 물질이기 때문에 NO₂ 가스에 노출

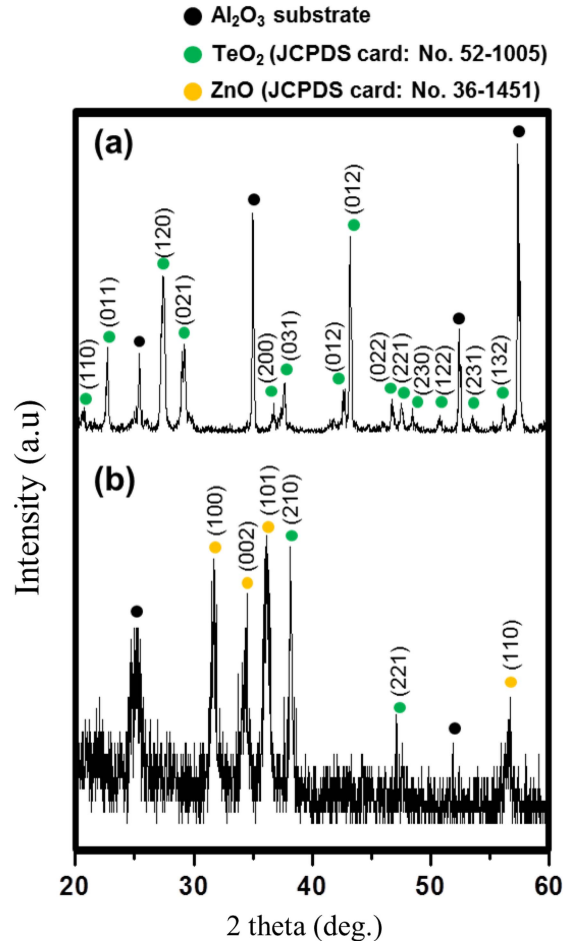


Fig. 2. XRD patterns of (a) bare TeO₂ NWs, (b) ZnO decorated TeO₂ NWs.

되면 저항이 감소하게 되고, 이에 따라 감도를 R_a/R_g로 나타내었다. Fig. 4(b)는 작동 온도에 따른 센서의 감도를 나타낸다. 이는 TeO₂ NWs의 최적 작동 온도가 350 °C라는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 ZnO로 장식된 TeO₂ NWs의 감도 그래프이며, 센서가 n-type 거동을 나타내기 때문에 감도를 R_g/R_a로 나타내었다. Fig. 4(d)에 나타난 바와 같이, ZnO가 장식된 TeO₂ NWs의 경우에도 최적 온도가 350 °C인 것을 확인할 수 있었고, 작동 온도가 낮아질수록 감도가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 낮은 온도에서는 센서 표면에 NO₂ 가스가 흡착되기 위한 에너지가 충분하지 않으며, 높은 온도에서는 가스의 탈착 속도가 흡착 속도보다 높기 때문이라고 할 수 있다.³⁴

Fig. 5는 ZnO로 장식된 TeO₂ NWs가 350 °C에서 10, 30, 50 ppm의 NO₂ 가스에 대한 감도 그래프를 나타낸다. 각각의 NO₂ 농도에 대해 1.44, 2.12, 3.11의 감도를 나타내었고, NO₂ 농도가 증가할수록 감도가 증가하는 것을 확인하였다.

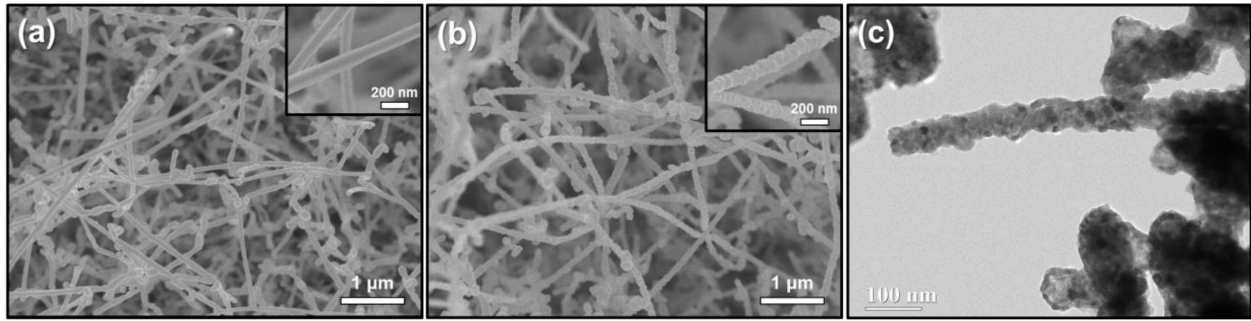


Fig. 3. SEM images of (a) bare TeO₂ NWs, (b) ZnO decorated TeO₂ NWs (Insets show high magnification images), (c) Typical TEM image of ZnO decorated TeO₂ NWs.

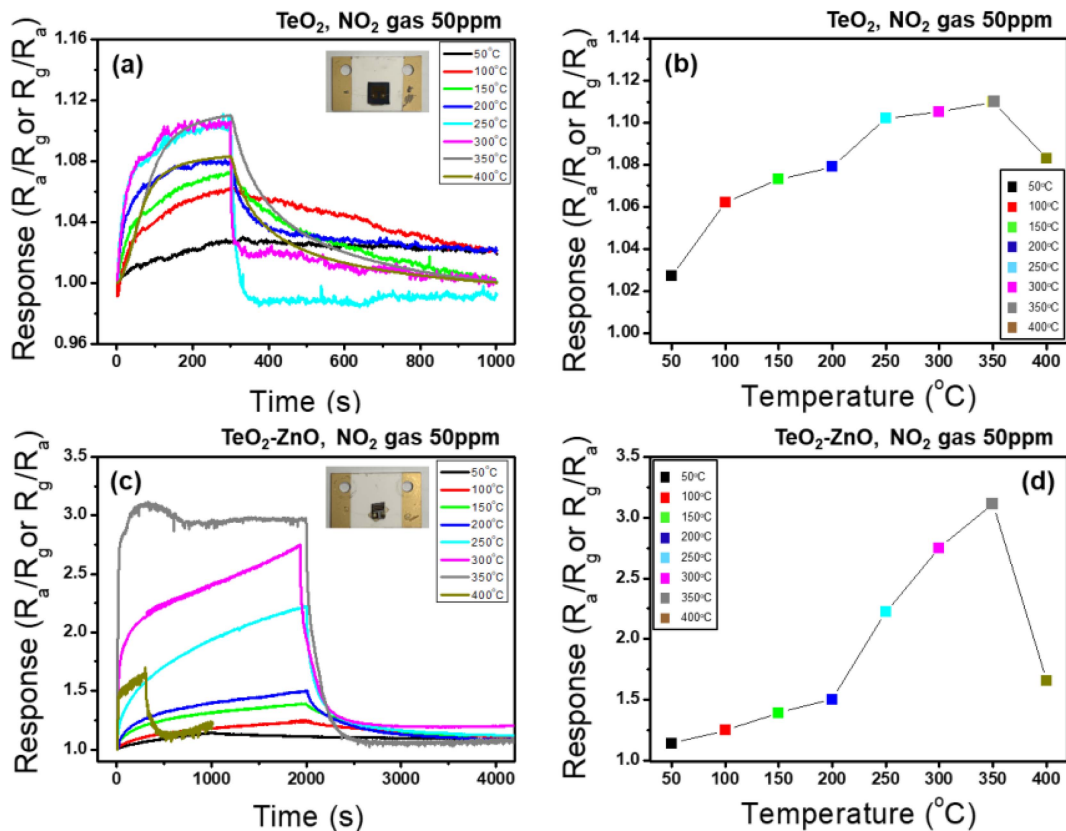


Fig. 4. Response of gas sensors towards 50 ppm NO₂ gas at different temperatures (a), (b) bare TeO₂ NWs (c), (d) ZnO decorated TeO₂ NWs.

TeO₂ NWs의 경우, NO₂ 가스에 대한 반응 시간 및 회복 시간이 각각 300s, 237s로 계산되었고, ZnO로 장식된 TeO₂ NWs의 경우는 각각 30s, 287s로 계산되었다. ZnO로 장식된 TeO₂ NWs가 NO₂ 가스에 대해서 훨씬 빠른 반응 속도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 추가적으로 Table 1에 TeO₂ NWs와 관련된 다른 문헌들의 반응시간 및 회복 시간에 대한 결과를 나타내었다.^{35,36} 다른 문헌들에 비해 반응 시간 및 회복 시간이 빠른 이유는 p-(TeO₂)/n-(ZnO) 이종 접합의 형성과 높은 작동 온도 때문이라고 할 수 있다.

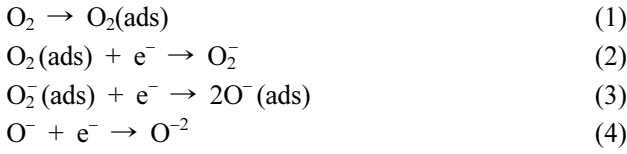
ZnO로 장식된 TeO₂ NWs의 선택성을 평가하기 위해

벤젠, 에탄올, 아세톤, CO, SO₂ 가스에 노출시켜 감도를 비교하였다. Fig. 6은 NO₂ (3.11)에 대한 감도가 벤젠 (1.32), 에탄올(1.31), 아세톤(1.2) CO (1.15), SO₂ (1.05) 보다 감도가 높다는 것을 확인할 수 있다. NO₂ 분자에서 질소는 비공유 전자쌍을 하나 가지고 있으며, 이것이 NO₂ 가스가 다른 가스들에 비해 흡착이 잘 되는 이유 중 하나이다. 비공유 전자쌍은 센서 표면과 쉽게 결합을 형성하기 때문에 센서 표면에 흡착 현상을 촉진하게 된다.³⁷

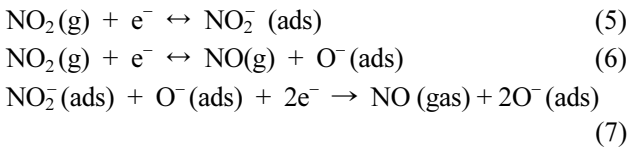
3.3. 가스 센싱 메커니즘

저항식 가스 센서는 타겟 가스에 노출 시, 저항 변화

를 기반으로 작동한다.³⁸⁾ 타겟 가스에 노출되지 않은 TeO₂ NWs 센서가 공기 중에 있을 때, 산소 분자는 TeO₂ NWs 표면에 흡착되고 TeO₂ NWs 가전자대에서 전자를 뺏어 산소 이온(예: O₂⁻, O⁻ 또는 O²⁻)으로 전환된다.³⁹⁾:



TeO₂ NWs의 표면으로부터 전자가 빠져나가면 TeO₂ NWs의 표면에 정공 축적층(HAL)이 형성된다. NO₂ 가스에 노출되면 NO₂ 가스는 TeO₂ NWs 표면에 흡착되며, NO₂의 높은 전기 음성도 때문에 전자가 NO₂ 분자에 흡착된다.^{40,41)}



이러한 반응의 결과로 전자와 정공의 결합(e⁻ + h⁺ → null)에 의해 HAL 폭이 증가하게 되고, 결과적으로 센

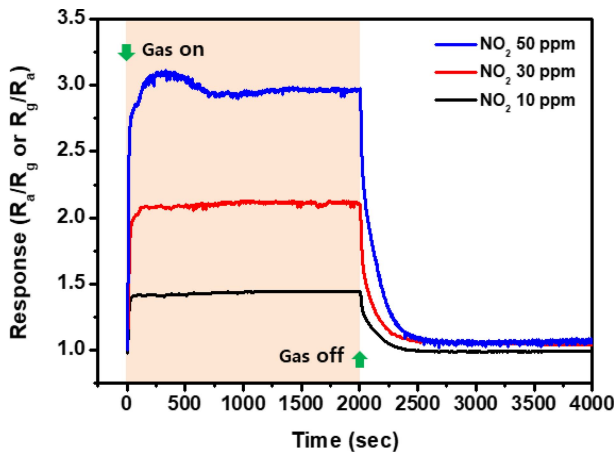


Fig. 5. Response curves for different concentrations of NO₂ gas at 350 °C.

서의 저항이 감소하게 된다. 이후, NO₂ 가스에 포획된 전자가 TeO₂ NWs 표면으로 방출되면서 초기 저항 값으로 돌아온다. 이 메커니즘을 Fig. 7(a)에 개략적으로 나

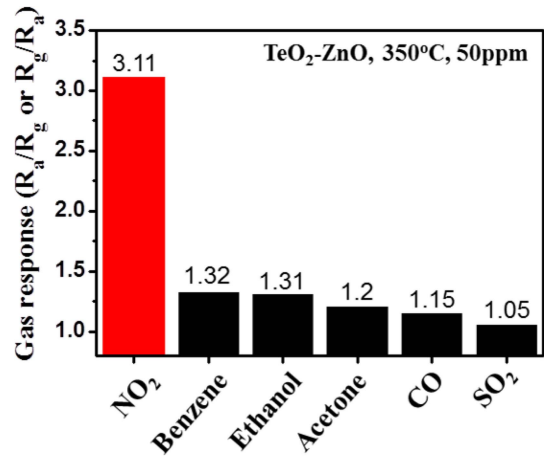


Fig. 6. Selectivity patterns for ZnO decorated TeO₂ NWs towards 50 ppm different gases at 350 °C.

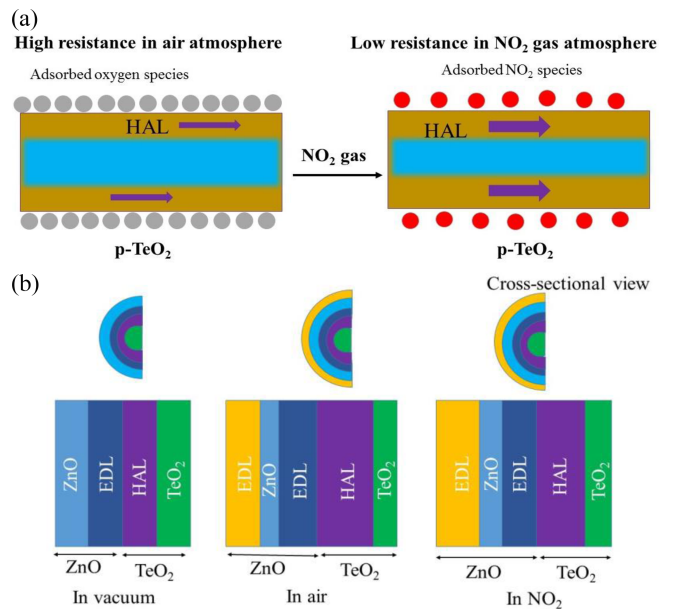


Fig. 7. Sensing mechanism of (a) bare and (b) ZnO decorated TeO₂ NWs gas sensor.

Table 1. Response and recovery time for various TeO₂ NWs.

Sample Number	Temperature	Sensing materials	Gas concentration [ppm]	Response time [sec]	Recovery time [sec]	Reference
1	350 °C	TeO ₂ NWs	50	300	237	This work
2	350 °C	ZnO-TeO ₂ NWs	50	30	287	This work
3	200 °C	Si-TeO ₂ branch NWs	50	140	170	[35]
4	200 °C	Si-TeO ₂ -Pd	50	105	100	[35]
5	100 °C	SnO ₂ NWs	10	344	-	[36]
6	100 °C	SnO ₂ -TeO ₂ NWs	10	242	-	[36]

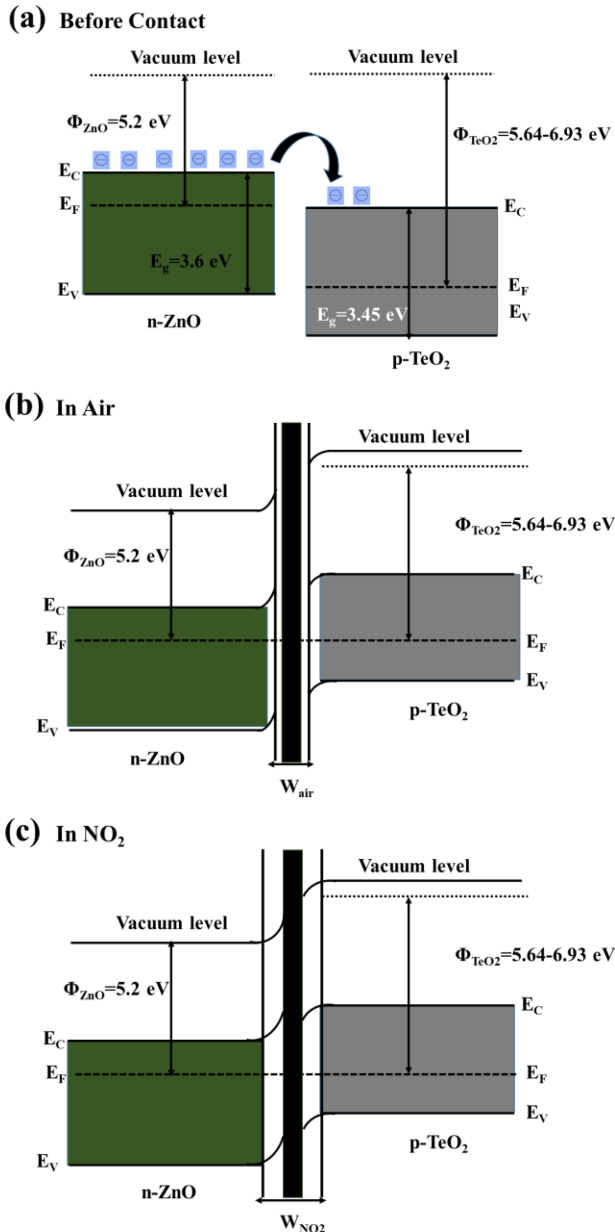


Fig. 8. Schematic representation of band gaps in ZnO/TeO₂ system (a) before contact (b) after contact in air and (c) after contact in NO₂.

타내었다. TeO₂ NWs 센서의 감도는 ZnO로 장식된 TeO₂ NWs 센서보다 낮으며, 이는 n-type에 비해 p-type 물질이 캐리어 이동도 차이로 인한 낮은 감지 특성을 가지기 때문이라고 할 수 있다.^{42,43)}

ZnO로 장식된 TeO₂ NWs는 n-type 감지 동향을 보였다. 이는 p-type 감지 동향을 보이는 TeO₂ 보다 n-type 감지 동향을 보이는 ZnO에 의해 지배되었다고 할 수 있다.

ZnO의 전자 이동도는 200 cm²/V×s로, 금속 산화물 중 가장 높은 값 중 하나이다.⁴⁴⁾ ZnO는 n-type 금속 산화물이기 때문에 흡착된 산소가 NO₂ 가스에 포획되면서 전

자 공핍층(EDL)을 형성한다.⁴⁴⁾

결과적으로 공기 중에서 센서에 두 개의 EDL 층이 형성된다. 하나는 공기 중에 ZnO가 노출되기 때문이고, 다른 하나는 ZnO와 TeO₂ 사이의 접촉 영역에서 전자가 이동하기 때문이다. 센서가 NO₂ 가스에 노출되면 ZnO의 표면뿐만 아니라 ZnO와 TeO₂ 사이의 이종접합에서도 전자가 빠져나가게 된다. 해당 감지 메커니즘은 Fig. 7(b)에 개략적으로 나타내었다.

ZnO로 장식된 TeO₂ NWs의 경우, Fig. 8과 같이 p-n 이종접합이 형성될 수 있다. 실제로 ZnO (5.2 eV),⁴⁵⁾ TeO₂ (5.64 ~ 6.93 eV)³⁵⁾의 일함수 차이로 인해 ZnO의 전자가 TeO₂로 흐르게 된다. 또한 ZnO-TeO₂ 계면에서 두 물질 사이의 격자 불일치로 인해 결함이 생성되는데, 이는 NO₂ 가스 및 산소 분자에 대한 흡착 사이트를 제공하여 센서의 감도를 향상시킬 수 있다.⁴⁶⁾

4. 결 론

요약하자면, 본 연구에서는 VLS 공법을 사용하여 TeO₂ NWs 및 ZnO 장식된 TeO₂ NWs를 성공적으로 합성하였다. 합성된 TeO₂ NWs의 형태 및 성분을 확인하기 위해 다양한 분석을 진행하였다. NO₂ 가스 감지는 다양한 작동 온도에서 진행되었으며, ZnO 장식된 TeO₂ NWs가 NO₂ 가스에 대해 훨씬 향상된 감도를 나타내었다. p-(TeO₂)/n-(ZnO) 이종 접합의 형성과 ZnO의 우수한 고유 특성이 ZnO 장식된 TeO₂ NWs 센서의 감도 향상에 주된 원인으로 작용했음을 확인할 수 있었다.

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (20013726) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

References

1. K.-Y. Kok, T.-F. Choo, N. U. Saidin and C. Z. C. A. Rahman, *Mater. Sci. Eng.*, **298**, 012015 (2018).
2. Y. Shen, A. Fan, D. Wei, S. Gao, W. Liu, C. Han and B. Cui, *RSC Adv.*, **5**, 29126 (2015).
3. M. Wu, H. Wei, Y. Wei, A. Yao, J. Bu, J. Lin, Z. Dong, Y. Che, C. Yi and Z. Wu, *Vib. Spectrosc.*, **95**, 32 (2018).
4. S. Khan, K. Hayat, S. Ali, K. Rasool, J. ud Din, F. Niaz and Y. Iqba, *Mater. Sci. Eng.*, **B**, **229**, 155 (2018).
5. M. Kaur, S. Kailasaganapathi, N. Ramgir, N. Datta, S. Kumar, A. K. Debnath, D. K. Aswal and S. K. Gupta, *Appl. Surf. Sci.*, **394**, 258 (2017).
6. J.-H. Kim, A. Mirzaei, H. W. Kim and S. S. Kim, *Sens.*

- Actuators, B, **249**, 177 (2017).
7. K. J. Choi and H. W. Jang, *Sensors*, **10**, 4083 (2010).
 8. J.-H. Lee, J.-Y. Kim, J.-H. Kim, A. Mirzaei, H. W. Kim and S. S. Kim, *Nano Convergence*, **4**, 27 (2017).
 9. A. Mirzaei, J.-H. Kim, H. W. Kim and S. S. Kim, *Sens. Actuators, B*, **258**, 270 (2018).
 10. J. G. Lu, P. Chang and Z. Fan, *Mater. Sci. Eng. Reports*, **52**, 49 (2006).
 11. Y. J. Kwon, S. Y. Kang, A. Mirzaei, M. S. Choi, J. H. Bang, S. S. Kim and H. W. Kim, *Sens. Actuators, B*, **249**, 656 (2017).
 12. Y. J. Kwon, H. G. Na, S. Y. Kang, M. S. Choi, J. H. Bang, T. W. Kim, A. Mirzaei and H. W. Kim, *Sens. Actuators, B*, **239**, 180 (2017).
 13. H.-J. Kim and J.-H. Lee, *Sens. Actuators, B*, **192**, 607 (2014).
 14. Y. Wu, M. Hu, Y. Qin, X. Wei, S. Ma and D. Yan, *Sens. Actuators, B*, **195**, 181 (2014).
 15. Y. Zhang, F. Guokang, H. U. Hui, C. Weilong and B. Yan, *J. Rare Earths*, **34**, 1069 (2016).
 16. A. W. Warner, D. L. White and W. A. Bonner, *J. Appl. Phys.*, **43**, 4489 (1972).
 17. N. Gupta and V. Voloshinov, *Optics Lett*, **30**, 985 (2005).
 18. A. Sharma, M. Tomar and V. Gupta, *Sens. Actuators, B*, **176**, 875 (2013).
 19. A. Mirzaei, S. Park, G.-J. Sun, H. Kheel and C. Lee, *J. Hazard. Mater.*, **305**, 130 (2016).
 20. T. Siciliano, M. D. Giulio, M. Tepore, E. Filippo, G. Micocci and A. Tepore, *Sens. Actuators, B*, **137**, 644 (2009).
 21. L. Zhu and W. Zeng, *Sens. Actuators, A*, **267**, 242 (2017).
 22. Ü. Özgür, Y. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin and S.-J. Cho, *J. Appl. Phys.*, **98**, 11 (2005).
 23. X. Qu, R. Yang, F. Tong, Y. Zhao and M. H. Wang, *Powder Technol.*, **330**, 259 (2018).
 24. A. Mirzaei, S. Park, G.-J. Sun, H. Kheel, C. Lee and S. Lee, *J. Korean Phys. Soc.*, **69**, 373 (2016).
 25. D. R. Miller, S. A. Akbar and P. A. Morris, *Sens. Actuators, B*, **204**, 250 (2014).
 26. Y. J. Kwon, A. Mirzaei, S. Y. Kang, M. S. Choi, J. H. Bang, S. S. Kim and H. W. Kim, *Appl. Surf. Sci.*, **413**, 242 (2017).
 27. J. Y. Park, K. Asokan, S. W. Choi and S. S. Kim, *Sens. Actuators, B*, **152**, 254 (2011).
 28. S. W. Choi, J. Y. Park and S. S. Kim, *Nanotechnology*, **20**, 465603 (2009).
 29. J. Y. Park, S.-W. Choi, J.-W. Lee, C. Lee and S. S. Kim, *J. Am. Ceram. Soc.*, **92**, 2551 (2009).
 30. H. W. Kim, S. H. Shim, J. W. Lee, J. Y. Park and S. S. Kim, *Chem. Phys. Lett.*, **456**, 193 (2008).
 31. S. W. Nam, Y. J. Kwon, H. Y. Cho, S. Y. Kang, H. G. Na and H. W. Kim, *J. Ceram.*, **16**, 385 (2015).
 32. Z. Jing and J. Zhan, *Adv. Mater.*, **20**, 4547 (2008).
 33. X. Liu, X. H. Wu, H. Cao and R. P. H. Chang, *J. Appl. Phys.*, **95**, 3141 (2004).
 34. A. Mirzaei, K. Janghorban, B. Hashemi, M. Bonyani, S. G. Leonardi and G. Neri, *Ceram. Int.*, **42**, 6136 (2016).
 35. Y. J. Kwon, S.-W. Choi, S. Y. Kang, M. S. Choi, J. H. Bang, S. S. Kim and H. W. Kim, *Sens. Actuators, B*, **244**, 1085 (2017).
 36. M. S. Choi, J. H. Bang, A. Mirzaei, H. G. Na, C. Jin, W. Oum, S. S. Kim and H. W. Kim, *Appl. Surf. Sci.*, **484**, 1102 (2019).
 37. H. W. Kim, Y. J. Kwon, A. Mirzaei, S. Y. Kang, M. S. Choi, J. H. Bang, S. S. Kim, *Sens. Actuators, B*, **249**, 590 (2017).
 38. P. Rai, Y. S. Kim, H. M. Song, M. K. Song, Y. T. Yu, *Sens. Actuators, B*, **165**, 133 (2012).
 39. A. Mirzaei, K. Janghorban, B. Hashemi, A. Bonavita, M. Bonyani, S. G. Leonardi, G. Neri, *Nanomaterials*, **5**, 737 (2015).
 40. S. An, S. Park, H. Ko, C. Jin, W. I. Lee, C. Lee, *Thin Solid Films*, **547**, 241 (2013).
 41. S. Park, H. Ko, S. Kim, C. Lee, *Ceram. Int.*, **40**, 8305 (2014).
 42. J.-H. Kim, J.-H. Lee, A. Mirzaei, H. W. Kim, S. S. Kim, *Sens. Actuators, B*, **258**, 204 (2018).
 43. N. Yamazoe, G. Sakai, K. Shimano, *Catal. Surv. Jpn.*, **7**, 63 (2003).
 44. A. Katoch, J. H. Kim, Y. J. Kwon, H. W. Kim, S. S. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 11351 (2015).
 45. A. Katoch, Z. U. Abideen, H. W. Kim, S. S. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 2486 (2016).
 46. Y. Wu, M. Hu, Y. Qin, X. Wei, S. Ma, D. Yan, *Sens. Actuators, B*, **195**, 181 (2014).

<저자 소속>

유동재

한양대학교 신소재공학부 학생

신가윤

한양대학교 신소재공학부 학생

엄완식

한양대학교 신소재공학부 학생

강석우

한양대학교 신소재공학부 학생

김은비

한양대학교 신소재공학부 학생

김형민

한양대학교 신소재공학부 학생

김현우

한양대학교 신소재공학부 교수