

# 수열합성법으로 성장시킨 ZnO 나노 로드기반 TFT 가스 센서 제조 및 특성평가

정준교<sup>1</sup>, 윤호진<sup>1</sup>, 양승동<sup>1</sup>, 박정현<sup>1</sup>, 김호진<sup>2</sup>, 이가원<sup>1,3,a</sup>

<sup>1</sup> 충남대학교 전자전파정보통신공학과

<sup>2</sup> 충남대학교 재료공학과

<sup>3</sup> 충남대학교 전자공학과

## Fabrication and Characterization of TFT Gas Sensor with ZnO Nanorods Grown by Hydrothermal Synthesis

Jun-Kyo Jeong<sup>1</sup>, Ho-Jin Yun<sup>1</sup>, Seung-Dong Yang<sup>1</sup>, Jeong-Hyun Park<sup>1</sup>, Hyo-Jin Kim<sup>2</sup>, and Ga-Won Lee<sup>1,3,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Radio Information Communication Engineering,

Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

<sup>2</sup> Department of Material Science Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

<sup>3</sup> Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

(Received January 23, 2017; Revised February 20, 2017; Accepted February 21, 2017)

**Abstract:** In this study, we fabricated a TFT gas sensor with ZnO nanorods grown by hydrothermal synthesis. The suggested devices were compared with the conventional ZnO film-type TFTs in terms of the gas-response properties and the electrical transfer characteristics. The ZnO seed layer is formed by atomic-layer deposition (ALD), and the precursors for the nanorods are zinc nitrate hexahydrate ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) and hexamethylenetetramine ( $((CH_2)_6N_4)$ ). When 15 ppm of NO gas was supplied in a gas chamber at 150°C to analyze the sensing capability of the suggested devices, the sensitivity (S) was 4.5, showing that the nanorod-type devices respond sensitively to the external environment. These results can be explained by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis, which showed that the oxygen deficiency of ZnO nanorods is higher than that of ZnO film, and confirms that the ZnO nanorod-type TFTs are advantageous for the fabrication of high-performance gas sensors.

**Keywords:** Oxide semiconductor, ZnO, Nanorod, Hydrothermal synthesis, NO, Gas sensor, Sensitivity

### 1. 서론

일반적으로 가스 센서는 재료의 화학적, 전기적 및 광학적 특성변화로부터 독성 또는 폭발성 가스를 감지

한다. 특히 전기적 저항 변화에 기반을 둔 산화물 반도체 가스 센서는 고감도의 특성을 가지며, 간단한 구조와 공정으로 생산이 가능하다는 장점을 가지고 있다 [1]. 산화물 반도체 중에서도 ZnO는 화학적 산소 결핍으로 인한 비화학량론적 성질 때문에 n형 반도체 특성을 나타낸다. 이러한 n형 박막을 산소 분위기에서 열처리하면 반도체 표면에 산소가 흡착되어 전자를 포획하면서 이온화된다. 이 때문에 표면에는 전자 공핍층이 형성되는데 이 후 산화 가스에 노출되면, 가스가 표면

a. Corresponding author; [gawon@cnu.ac.kr](mailto:gawon@cnu.ac.kr)

Copyright ©2017 KIEEME. 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.

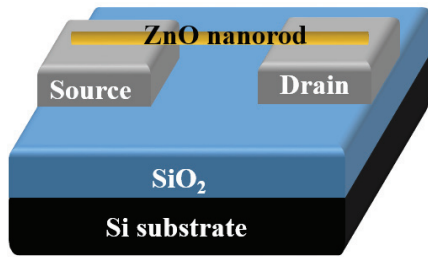


Fig. 1. The general schematic of ZnO nanorod TFTs.

에 흡착되면서 전자 공핍층의 두께가 증가된다. 따라서 박막의 저항이 커지므로 산화 가스 노출 유무에 따른 저항 차를 이용하여 가스 센서로 사용할 수 있다 [2,3].

통상 가스 센서는 감도 및 선택도를 높이기 위해 넓은 표면적을 필요로 하는데 수십 nm 크기의 나노 구조를 도입할 경우 부피 대비 표면적 비율을 높일 수 있기 박막 형태의 구조보다 유리하다고 할 수 있다 [4,5]. 이러한 이유로 나노 구조는 센서를 비롯한 전자 및 광소자 응용을 위한 필수적인 요소로 주목받고 있다. 최근 ZnO 나노로드를 이용하여 자외선 광 검출기 및 발광 소자 배열을 포함한 다양한 나노 소자가 연구되고 있다. 나노 구조를 만드는 방법에는 기상 수송법 (vapor-liquid-solid, VLS) [6], 화학적 기상 증착법 (chemical vapor deposition, CVD) [7], 아크 방전법 (Arc-discharge method) [8], 템플릿을 이용한 증착법 [9], 졸-겔 증착법(Sol-gel deposition) [10], 수열합성법(hydrothermal synthesis) [11] 등이 있다. 이 중에서 수열합성법은 저온 공정이 가능해 다양한 기판에서 합성을 할 수 있으며, 대기압에서도 합성이 가능해 경제성이 높고, 대면적 합성, 재현성 및 균일한 성장이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 고감도 가스 센서용으로 수열합성법으로 성장시킨 ZnO 나노로드를 채널층으로 사용하는 박막 트랜지스터 구조를 제안하고 제작하였다. 일반적인 나노로드 가스 센서는 나노로드를 형성하고 이를 박리시킨 뒤 그림 1과 같이 포토리소그래피 기술을 이용하여 형성된 전극사이에 위치시킴으로써 평면형 트랜지스터 구조로 제작된다 [12-14]. 하지만 나노로드와 검출 플랫폼에 형성된 전극의 인터커넥션 문제로 수율을 크게 저하시킬 수 있는 안정성과 재현성 측면의 단점을 안고 있는 것이 사실이다. 이에 나노로드가 형성된 ZnO 박막을 채널로 사용하는 소자를 제작하고

센서로의 적용 가능성을 확인함으로써 이러한 문제를 개선시키고자 하였다.

## 2. 실험 방법

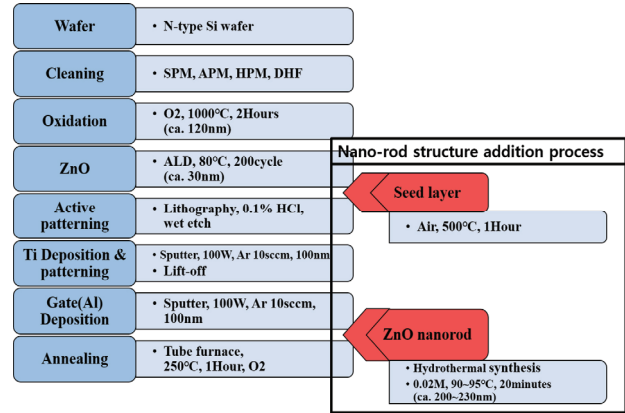


Fig. 2. The process flow of the suggested ZnO TFT was nanorods grown by hydrothermal synthesis. The main flow is for conventional TFT whose channel is composed by ALD and the additional process steps for nanorod devices at highlighted by black box.

그림 2는 앞에서 제시한 채널에 나노로드가 형성된 소자의 제작과정을 보여준다. 기존 소자와의 특성 비교를 위해 일반적인 박막 트랜지스터를 함께 제작하여 분석하였다. 오른쪽 박스로 표기된 부분이 기존 소자 제작 공정에서 수열합성법을 통해 나노로드를 형성하기 위해 추가한 공정을 나타낸다. n<sup>+</sup> 실리콘 기판 위에 게이트 절연체로서 120 nm 두께의 thermal SiO<sub>2</sub>를 성장시킨 후 active layer로 나노로드가 형성된 ZnO 박막을 형성하기 위해 atomic layer deposition (ALD)를 이용하여 80°C에서 30 nm의 ZnO를 증착하였다. 전구체로 diethylzinc (DEZ, Zn(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>)를 사용하였다. 이후, 나노로드 소자에 대해서는 ZnO seed layer 형성을 위하여 공기 분위기에서 500°C, 1시간 열처리를 진행했고, 0.1% 희석된 HCl 용액을 이용하여 채널을 식각하였다. 소스/드레인 전극 형성은 RF magnetron sputtering을 이용하여 Ti를 증착한 뒤 lift-off 공정을 이용하였으며 게이트의 경우는 실리콘 기판 뒷면에 RF magnetron sputtering으로 Al을 증착하여 전극을 형성하였다. 전극을 모두 형성한 후 ZnO 나노로드 TFT 소자에 대해서는 나노로드 성장을

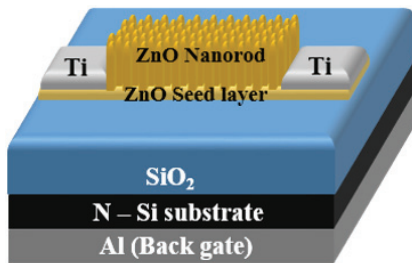


Fig. 3. The schematic of fabricated ZnO nanorods TFTs.

위해 90~95°C에서 20분 동안 수열합성법을 진행했다. 나노로드 전구체로 Zinc nitrate hexahydrate ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )와 Hexamethylenetetramine ( $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ )를 사용하였으며 용액의 몰 농도는 0.02 mol이다. 마지막으로 250°C,  $\text{O}_2$  분위기에서 1시간 동안 furnace 열처리를 진행하였다.

그림 3은 본 연구에서 제안하고 있는 나노로드가 형성된 ZnO 박막을 채널로 사용하는 ZnO 트랜지스터 구조이며 제작된 소자의 전압과 전류 특성은 HP 4155C semiconductor parameter analyzer를 사용하여 측정하였다. 특히 제안된 소자의 동작 메커니즘을 규명하기 위해 물리적으로 X선 광전자 분광법(XPS)으로 분석하였고 전기적으로는 전압과 전류 전달 특성이 외에 가스 반응 특성 측정을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 4는 수열합성법으로 제작된 나노로드의 주사 전자 현미경(FE-SEM) 사진이다. ZnO 박막이 15 nm 증착되어 있고, 그 위로 Z축 방향으로 매우 우수한 성장 특성을 보이는 나노로드가 잘 형성되었음을 알 수 있다. 이 때 나노로드의 직경과 길이는 각각 40~50 nm와 200 nm이다. 이러한 나노로드 구조체가  $1 \text{ cm}^2$ 의 면적에 균일하게 성장되었다고 가정하고, 나노로드의 개수를 계산하면  $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 개가 형성되었다고 볼 수 있다. 이를 바탕으로 표면적을 계산하였을 때 박막 구조 소자 보다 20배 이상의 표면적 증가를 얻을 수 있게 있다.

그림 5에는 ZnO 나노로드가 형성된 박막과 그렇지 않은 박막의 X선 회절(XRD) 패턴을 비교하여 나타내었다. 두 경우 모두 (002), (100), (101) 등의 피크를

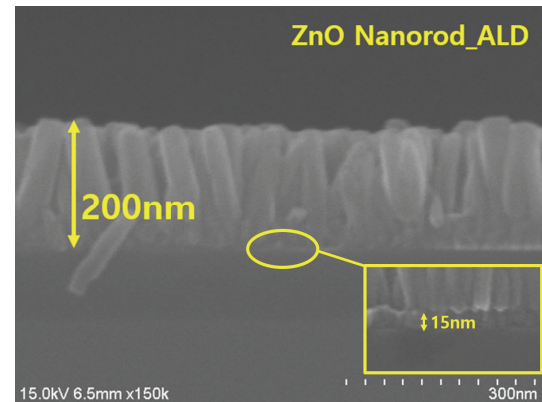


Fig. 4. The FE-SEM image of the ZnO nanorods structure. The ZnO film is 15 nm and the nanorod diameter and length are 40~50 nm and 200 nm respectively.

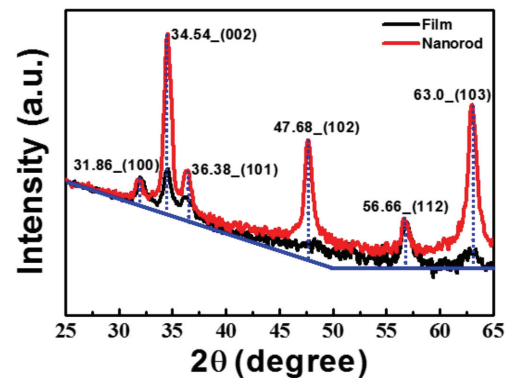


Fig. 5. The XRD pattern of the ZnO film and ZnO nanorod.

보이면서 ZnO의 기본 구조인 우르자이트 구조를 따르는 것으로 나타났다. 하지만 ZnO 나노로드의 경우 특히 앞 서의 FESEM 결과에서처럼 (002), (102), (103)의 피크가 우세한 것을 확인 할 수 있다.

ZnO 박막과 나노로드의 원자 결합 상태를 정량적으로 비교하기 위해 XPS를 이용하여 그림 6에 나타낸 바와 같이 O 1s 피크를 측정하였으며 각각을 가우시안 함수를 이용하여 3개의 피크로 분리를 하였다. 그림에서 529.9±0.2 eV에 나타나는 빨간색 선은 Zn-O 결합, 531.3±0.2 eV에 나타나는 파란색 선은 산소 공공( $\text{V}_\text{O}$ ), 532.3±0.5 eV에 나타나는 파란색 선은 OH기를 의미한다 [15,16]. 박막과 나노로드 시료에서 전체 면적대비 각 피크의 면적 비율을 구하였는데 표 1에 나타낸 바와 같이 나노로드의 경우 박막에 비해  $\text{V}_\text{O}$ 의 비가 더 높음을 확인 할 수 있다.

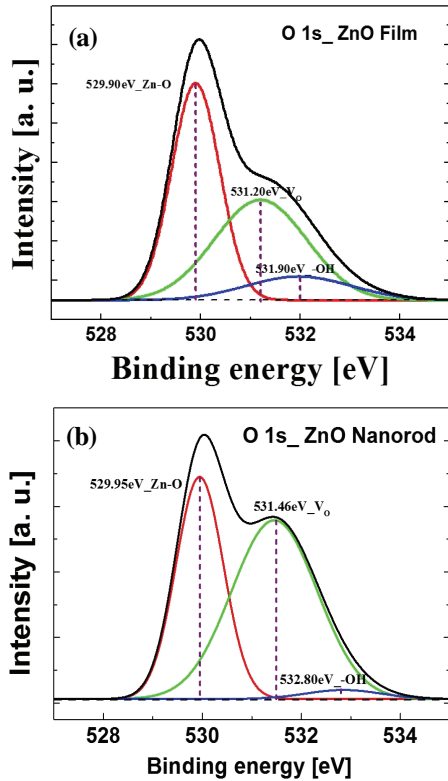


Fig. 6. XPS O 1s spectra analysis peak of ZnO film and ZnO nanorods.

Table 1. The value of the area of each peak relative to the total area.

Structure	Film	Nanorod
Zn-O / Total (%)	0.47	0.40
VO / Total (%)	0.42	0.58
-OH / Total (%)	0.11	0.02

일반적으로 나노로드가 외부 가스에 노출이 되었을 때, 특히 산화성 가스인 NO에 노출되었을 때는 다음과 같은 메커니즘으로 전기적 변화가 나타나는 것으로 설명한다. 그림 7은 나노로드 표면에 NO가 흡착되었을 때의 모습으로 나노로드 내에 존재하는  $V_O$ 를 포획하는 것을 보여준다. 따라서 표면의 전자 공핍층이 두꺼워지고 그로 인해 전기 전도도는 감소하게 된다. 따라서  $V_O$ 가 많이 존재할수록 가스 센서의 감도가 증가할 수 있는데 앞서의 XPS 분석 결과는 ZnO 나노로드가 형성된 박막을 가스 센서로 사용할 경우 높은 감도를 가질 수 있음을 보인다고 할 수 있다.

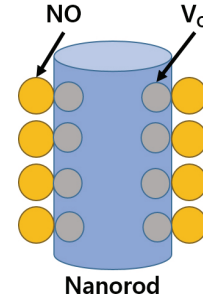


Fig. 7. Nanorod surface adsorption state of NO gas showing the gas sensing mechanism

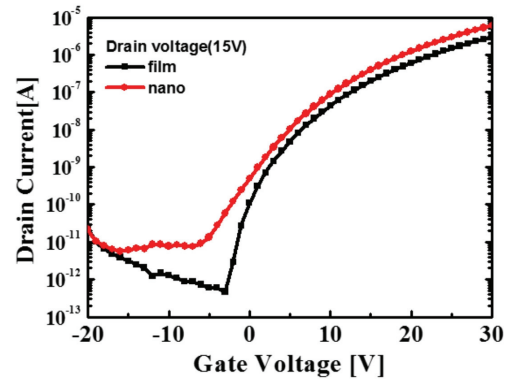


Fig. 8. The current transfer characteristics of the fabricated ZnO film and ZnO nanorods TFTs.

그림 8은 제작된 ZnO 나노로드 트랜지스터의 전달 특성을 측정한 결과이다. 기존의 ZnO 박막 소자와 유사한 구동 특성을 보이고 있다.

제작된 소자의 전기적 안정성을 확인하기 위해 게이트에 양의 전압을 인가하고 전달 특성 곡선을 비교한 것이 그림 9이다. 10 V 게이트 전압 스트레스 하에서 1,000초 후에, 두 소자 모두 subthreshold swing (SS)의 변화 없이 양의 방향으로의 문턱전압( $V_{TH}$ ) 이동을 보여준다.  $V_{TH}$  변화는 채널 또는 채널과 게이트절연체 계면에 존재하는 트랩 사이트에 전자가 포획되어 나타나거나 [18,19], 주변 효과(ambient effect)에 의해 표면에 흡착된 가스에 의해 전자를 빼앗겨 나타나는 현상이라 볼 수 있다 [20,21].

ZnO 박막에서의 트랩 형성 요인으로는 아연 interstitial ( $Z_i$ ), 아연 공공( $V_z$ ),  $V_O$  등이 있는데 이중 가장 많이 언급되는 것이  $V_O$ 임을 고려할 때 [22,23] ZnO 나노로드 구조 소자에서  $V_{TH}$ 의 이동이 더 큰 것은 XPS 결과와 일치한다.

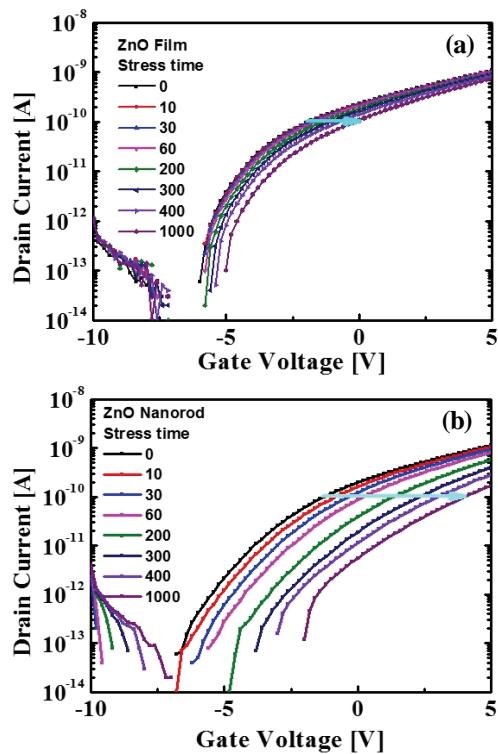


Fig. 9. The current transfer characteristics of the fabricated (a) ZnO film and (b) ZnO nanorods TFTs according to the positive gate bias stress time.

다. 또한 나노로드의 경우 앞서 언급한 바와 같이 부피 대비 표면적 비율이 높기 때문에 주변 효과에도 더욱 민감하게 반응하는 것도 주요인으로 판단된다.

그림 10은 150°C의 가스챔버 내에서 NO 가스에 대한 ZnO 박막과 나노로드 구조에서의 가스센싱 특성을 시간에 따라 측정한 결과이다. O<sub>2</sub> 가스를 500 sccm을 공급하는 상태에서 소자의 저항이 안정된 값에 도달하면 15 ppm의 NO 가스를 5분간 공급하면서 저항의 변화를 확인하였다. 그림에서 파란색 점선은 NO 가스 유입의 시작과 끝을 나타낸다. 회복시간은 NO 가스 공급을 중단한 후 20분간 진행하였다. 그림과 같이 NO 가스 공급과 차단을 여러 차례 반복하여 재현성을 확인하였고, 실험 결과 ZnO 나노로드 구조 소자의 경우 NO 가스를 유입할 경우 저항이 증가하고 유입을 멈출 경우 다시 원래의 저항으로 회복되는 가스 센싱 특성을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 반응 시간과 회복시간은 반응하는 면적이나 가스챔버의 온도 등에 따라 차이가 있지만, 제작한 나노로드 구조의 가스 센서의 감지 속도는 2~3분, 회복 속도는 20분 정도로

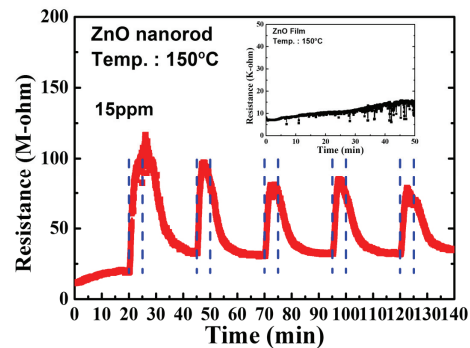


Fig. 10. Sensing response of the ZnO sensor based on nanorods and film. The testing gas is 15 ppm NO<sub>2</sub>. The sensor operating temperature is 150°C.

기존에 연구된 평면형 가스센서나 나노로드형 가스센서 소자와 유사한 속도를 보인다 [2,24]. 그림 10에서 가장 처음 센싱을 한 저항값이 이후에 측정한 저항값보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 소자가 외부환경에 노출되어 있었기 때문에 표면에 이물질이나 가스 등이 반응해 나타나는 현상이라 볼 수 있다. 가스센서의 감도(S)를 공기 중에서의 소자 저항값(R<sub>air</sub>)을 NO 가스를 주입한 후의 소자 저항값(R<sub>gas</sub>)으로 나눈 것으로 정의하였을 때, 제작된 소자의 경우 NO 가스 농도 15 ppm에서 평균 4.5 정도의 감도를 나타냈다. 이에 비해 그림 10 안의 그림은 박막 구조 소자의 가스 센싱 특성을 보여주고 있는데, NO 가스 유입에 따라 저항 값이 변화하지 않고 일정하게 증가하는데 이는 앞서 살펴본 바와 같이 기존의 박막 구조가 비표면적이 매우 작기 때문에 가스 센싱 특성이 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 따라서 수열합성법으로 성장시킨 나노로드 구조의 소자가 고감도 가스 센서용으로 매우 적합한 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 향후 나노로드를 추가로 형성하였을 때 채널 전도도에 미치는 영향이 보다 구체적으로 밝혀질 경우 제안된 소자의 특성향상이 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고감도 가스센서 적용을 위해 나노로드가 형성된 박막을 채널로 갖는 나노로드 구조의 소자를 제작하였으며 NO 가스에 대한 센싱 특성을 확인하였다. 트랜지스터 전달 특성 곡선에서는 박막 소자와

비슷한 전기적 특성을 보였으나 게이트 스트레스 인가 시 박막 구조에 비해  $V_{TH}$  변화가 크게 나타났다, 이는 SEM과 XPS 분석을 통해 확인한 바와 같이 나노로드 구조가 박막 구조에 비해  $V_0$ 의 양이 많으면서 부피에 대한 면적이 크기 때문으로 설명할 수 있다. NO 가스에 대한 센싱 특성의 경우 재현성과 함께 평균 4.5의 높은 감도를 보이는 것을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음[10049270, 웨어러블 스마트 기기를 위한 컴퓨터비전기반 UI/UX용 SoC 및 SW 플랫폼 연구]. 또한 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 [NRF-2014R1A1A3052808].

### REFERENCES

- [1] N. Yamazoe, *Sens. Actuators, B: Chem.*, **108**, 2 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.12.075>]
- [2] A. Z. Sadek, S. Choopun, W. Wlodarski, S. J. Ippolito, and K. Kalantar-zadeh, *IEEE Sens. J.*, **7**, 919 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.895963>]
- [3] C. Soci, A. Zhang, B. Xiang, S. A. Dayeh, D.P.R. Aplin, J. Park, X. Y. Bao, Y. H. Lo, and D. Wang, *Nano Lett.*, **7**, 1003 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nl070111x>]
- [4] L. W. Ji, S. M. Peng, Y. K. Su, S. J. Young, C. Z. Wu, and W. B. Cheng, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 203106 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3141447>]
- [5] J. J. Hassana, M. A. Mahdia, C. W. China, H. Abu-Hassana, and Z. Hassana, *Sens. Actuators, B: Chem.*, **176**, 360 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.09.081>]
- [6] Y. Wu and P. Yang, *Chem. Mater.*, **12**, 605 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1021/cm9907514>]
- [7] M. Yazawa, M. Koguchi, A. Muto, M. Ozawa, and K. Hiruma, *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 2051 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.108329>]
- [8] Y. C. Choi, W. S. Kim, Y. S. Park, S. M. Lee, D. J. Bae, Y. H. Lee, G. S. Park, W. B. Choi, N. S. Lee, and J. M. Kim, *Adv. Mater.*, **12**, 746 (2000). [DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:10<746::AID-ADMA746>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:10<746::AID-ADMA746>3.0.CO;2-N)]
- [9] K. T. Kim, M. J. Kim, and S. M. Cho, *Mater. Chem. Phys.*, **96**, 278 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.07.013>]
- [10] Y. J. Tak and K. J. Yong, *J. Phys. Chem. B*, **109**, 19263 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1021/jp0538767>]
- [11] M. Y. Cho, M. S. Kim, G. S. Kim, H. Y. Choi, S. M. Jeon, K. G. Yim, D. Y. Lee, J. S. Kim, J. S. Kim, J. I. Lee, and J. Y. Leem, *J. Korean Vac. Soc.*, **19**, 236 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.5757/JKVS.2010.19.3.236>]
- [12] Q. H. Li, Y. X. Liang, Q. Wan, and T. H. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 6389 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1840116>]
- [13] M. W. Ahn, K. S. Park, J. H. Heo, D. W. Kim, K. J. Choi, and J. G. Park, *Sens. Actuators, B: Chem.*, **138**, 168 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.02.008>]
- [14] T. J. Hsueh, C. L. Hsu, S. J. Chang, and I. C. Chen, *Sens. Actuators, B: Chem.*, **126**, 473 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.03.034>]
- [15] J. J. Park, S. H. Lee, and K. J. Yong, *Nanotechnology*, **23**, 385707 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/38/385707>]
- [16] S. H. Baek, J. J. Song, and S. W. Lim, *Physica B*, **399**, 101 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.05.030>]
- [17] E. B. Lee, Y. W. Park, I. S. Hwang, S. J. Kim, J. G. Cha, H. J. Lee, J. H. Lee, and B. K. Ju, *Journal of IKEEE*, **13**, 37 (2009).
- [18] J. M. Lee, I. T. Cho, J. H. Lee, and H. I. Kwon, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 093504 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2977865>]
- [19] Y. F. Lu, H. Q. Ni, Z. H. Mai, and Z. M. Ren, *J. Appl. Phys.*, **88**, 498 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.373685>]
- [20] S. Y. Sung, J. H. Choi, U. B. Han, K. C. Lee, J. H. Lee, J. J. Kim, W. T. Lim, S. J. Pearton, D. P. Norton, and Y. W. Heo, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 102107 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3357431>]
- [21] J. K. Jeong, H. W. Yang, J. H. Jeong, Y. G. Mo, and H. D. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 123508 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2990657>]
- [22] M. D. McCluskey and S. J. Jokela, *J. Appl. Phys.*, **106**, 071101 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3216464>]
- [23] J. Yao, N. Xu, S. Deng, J. Chen, J. She, H. P. David Shieh, P. T. Liu, and Y. P. Huang, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **58**, 1121 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2011.2105879>]
- [24] F. T. Liu, S. F. Gao, S. K. Pei, S. C. Tseng, and C.H.J. Liu, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, **40**, 528 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2009.03.008>]