

예비 처리 방법에 따른 박막 SnO₂ 센서의 가스 감응 특성

윤광현 · 김종원* · 류기홍** · 허중수†

Gas sensing characteristics of thin film SnO₂ sensors with different pretreatments

Kwang-Hyun Yun, Jong-Won Kim*, Gi-Hong Rue**, and Jeung-Soo Huh†

Abstract

The SnO₂ thin film sensors were fabricated by a thermal oxidation method. SnO₂ thin film sensors were treated in N₂ atmosphere. The sensors with O₂ treatment after N₂ treatment showed 70 % sensitivity for 1 ppm H₂S gas, which is higher than the sensors with only O₂ treatment. The Ni metal was evaporated on Sn thin film on the Al₂O₃ substrate. And the sensor was heated to grow the Sn nanowire in the tube furnace with N₂ atmosphere. Sn nanowire was thermally oxidized in O₂ environments. The sensitivity of SnO₂ nanowire sensor was measured at 500 ppb H₂S gas. The selectivity of SnO₂ nanowire sensor compared with thin film and thick film SnO₂ was measured for H₂S, CO, and NH₃ in this study.

Key Words : SnO₂, gas sensor, N₂, nanowire, H₂S

1. 서 론

산업 발전과 더불어 대두된 대기오염 문제로 인하여 여러 가지 유해 가스 종들을 감지하기 위한 가스 센서의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 가스센서는 가스를 안정되고 신뢰성 있게 감지하는 것이 중요하다. 그러므로 환경 측정용, 자동차용, 의료용, 국방용, 산업용 등의 각종 응용 분야에서 요구되는 기능과 목적을 위해 빠른 응답 속도, 고감도, 안정성, 재현성, 선택성 및 경제성 등을 충족시키는 가스 센서가 요구되고 있다^[1].

가스 센서는 용도와 사용 목적 및 감지 대상에 따라 다양한 종류가 개발 연구되고 있으며, 감지 방식에 따라 반도체식 센서, 고체 전해질식 센서, 접촉 연소식 센서, 전기 화학식 센서 및 비분산 적외선 센서 등으로 분류된다. 이 중에서 반도체식 가스 센서는 가스에 대한 감도가 높고 빠른 응답속도를 가지며 제작이 용이할

뿐만 아니라 적당한 첨가제의 적용으로 특정가스에 대한 선택성의 부여가 가능하다는 장점을 지니고 있다^[2].

반도체식 가스 센서는 주로 반도체의 성질을 가진 산화물을 사용하여 산화물 표면에서 일어나는 각종 가스의 흡착 및 탈리에 의한 산화물 표면의 전기 전도도의 변화를 이용하고 있다^[3]. 가스 센서용 산화물 반도체 재료로 가장 많이 이용되고 있는 SnO₂^[4]를 비롯하여, ZnO^[5], WO₃^[6], TiO₂^[7] 등이 개발, 연구되어 오고 있다. 특히, SnO₂와 In₂O₃는 다양한 가연성 및 유독가스 감지가 뛰어나 가스 센서로 널리 쓰이고 있다. 기존에는 산화물 반도체 센서 막을 후막으로 제조해서 감응 특성을 연구해 왔으나, 최근에는 박막 센서, 나노 와이어 센서 등의 활발한 연구가 진행되고 있다.

금속 Sn을 열증착법으로 알루미늄 기판에 박막으로 증착한 후, 열처리하여 박막 SnO₂ 가스 센서를 만들었다. 또한 박막 Sn 필름에 니켈을 증착시켜 질소 분위기에서 열처리하여 Sn 나노 와이어를 성장시켰다. SnO₂ 박막의 표면 상태와 결정 구조 등을 알아보기 위해 주사 전자현미경(FE-SEM, Hitachi S-4300), X-선 회절장치(XRD, X'Pert Grahpics & Identify, Cu K alpha 1), 투과 전자현미경(TEM, Hitachi H-7100, 100 kV)을 사용하였다. 그리고 후막, 박막, 나노 와이어 등 막 형태에 따른 센서의 감도 비교를 위해 황화수소와 암모니

경북대학교 금속공학과 (Department of Materials Science and Metallurgy, Kyungpook National University)

*경북대학교 나노과학기술과 (Department of Nano-science and Technology, Kyungpook National University)

**경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

†Corresponding author: jshuh@knu.ac.kr

(Received : December 5, 2005, Accepted : March 8, 2006)

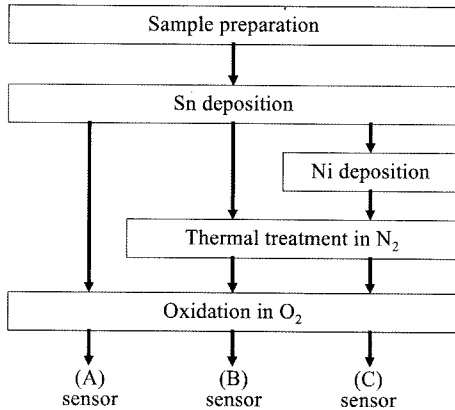


그림 1. 가스 센싱 물질 제조의 개요도
Fig. 1. Schematic diagram of fabrication process of gas sensing materials.

아, 그리고 일산화탄소 가스에 대한 감지 특성을 살펴 보고, 측정 가스에 대한 선택성을 조사하였다.

본 연구의 목적은 분위기별 열처리 조건에 따른 후막, 박막, 나노 와이어 등 막 형태의 특성 변화와 황화 수소, 암모니아, 그리고 일산화탄소 가스에 대한 센서의 감도 비교 및 선택성을 살펴보는 것이다.

2. 실험 방법

알루미늄 기판에 금속 주석을 열 증착법으로 상온의 기판 온도에서 약 5,000 Å 두께로 증착시킨 후, 처리 방법에 따라 세 가지로 센서를 분류하여 그림 1에 나타내었다.

우선 650 °C의 산화 분위기에서 3시간 열처리를 하여 (A) 센서를 만들었다. 증착된 금속 주석을 질소 분위기에서 700 °C에서 3시간 열처리 한 후 (A) 센서와 같은 방법으로 산화시켜 (B) 센서를 제작하였다. 금속 주석층 위에 약 50 Å 두께의 금속 니켈을 이온 코팅법으로 덧 증착시킨 후 (B) 센서와 마찬가지로 질소 처리 후 산소 처리하여 (C) 센서를 제작하였다. 각 센서는 에어 분위기에서 안정화를 유지한 상태에서 측정 가스를 주입하여 감도를 확인하였고, 감도는 식 (1)에 의해서 대기 하에서의 저항(R_a)에 대한 대상 가스에 의한 저항(R_g) 변화 비율로 계산하였다.

$$Sensitivity = \frac{(R_a - R_g)}{R_a} \times 100(\%) \quad (1)$$

(C) 센서의 경우, 나노 사이즈 직경의 주석 와이어가 성장하였다. 이 나노 와이어는 vapor-liquid-solid(VLS)

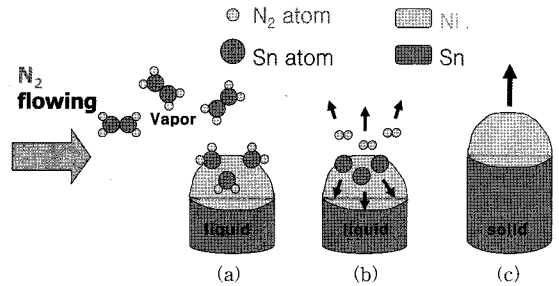


그림 2. 주석 나노 와이어 성장 과정의 개요도
Fig. 2. Schematic of Sn nanowire growth process.

법으로 성장하였다. 성장 모식도를 그림 2에 나타내었다.

700 °C에서 열처리를 하게 되면, 231.9°C의 녹는점을 갖는 금속 주석은 녹게 되고 일부는 휘발되어 튜브로 내부를 떠다니게 된다. 100 sccm의 유량으로 흐르고 있는 분위기 가스인 질소의 도움으로 휘발된 주석이 촉매인 니켈의 표면에 흡착하게 된다(a). 질소는 떨어져 나가면서 흡착하고 있던 주석이 니켈과 액체 주석의 경계면으로 확산되어 들어간다(b). 일정 농도 이상으로 과포화가 되면 로렌시 일정 방향으로 주석 나노 와이어가 석출된다(c). 이러한 석출 과정이 연속적으로 진행되어 나노 와이어 형태로 성장하게 된다^[8-11]. 나노 와이어는 석출되는 방향에 따라 tip growth^[12]와 bottom growth^[13]로 나뉜다. 이 성장에서 니켈 촉매를 머리에 쓰고 나노 와이어가 성장하였으므로, tip growth로 성장하였다고 할 수 있다. 하지만, TEM 사진에서 확인할 수 있듯이 촉매가 나노 와이어의 첨단에서 뿐만 아니라 나노 와이어의 중간 부분에도 관찰되었다. 따라서 bottom growth와 tip growth의 두 방법으로 성장하였음을 알 수 있다. 이 때 니켈은 와이어의 직경 성장을 제한하여 나노 사이즈 직경의 와이어 성장을 가능하게 도와주는 촉매 역할을 한다. 또한 나노 와이어의 가스 감응 특성에도 촉매 역할을 하여 감도에 영향을 주게 된다.

나노 와이어에 측정 가스들이 흡착했다가 탈착을 하게 되면, 그에 따른 전기 저항의 변화가 생기게 되고, 이 값은 감도값으로 측정된다. 나노 와이어의 접촉면에서 저항값의 차이가 접촉면이 없는 부분보다 훨씬 더 크다. 이러한 나노 와이어의 접촉면은 네트워크를 이루고 있기 때문에 저항의 변화값, 즉 센서의 감도값이 기존의 후막이나 박막 센서보다 훨씬 더 크게 측정된다.

3. 결과 및 고찰

알루미늄 기판 위에 증착된 주석과, 각 처리 방법에

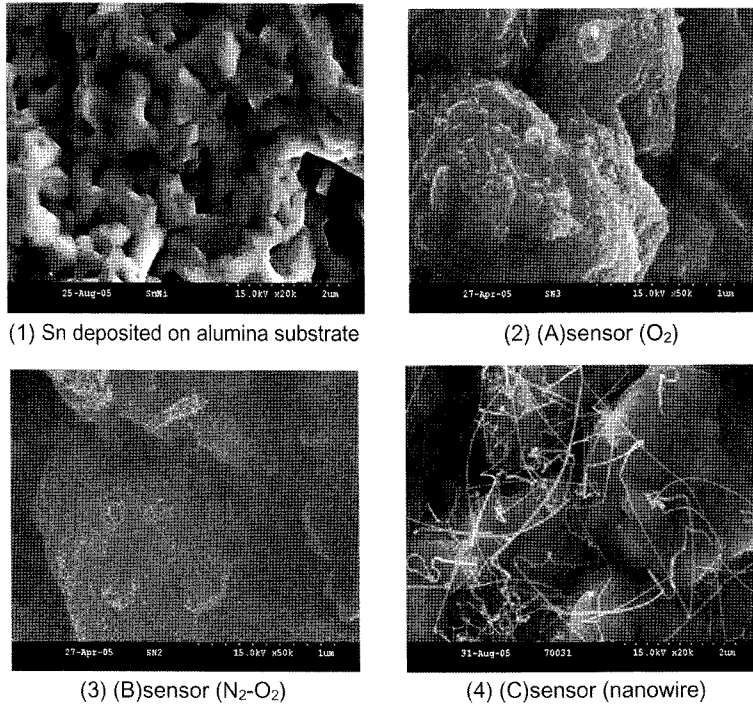
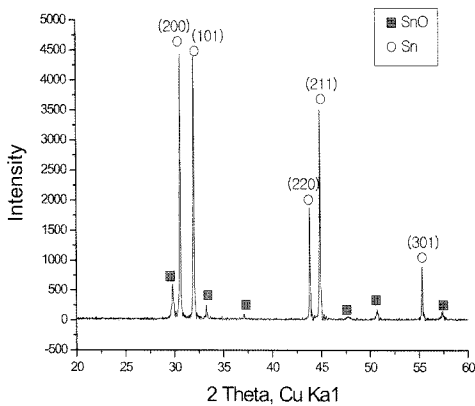


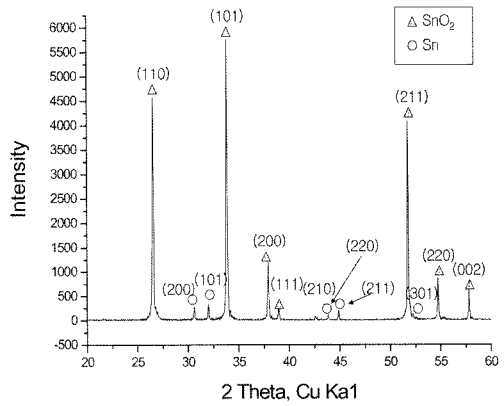
그림 3. (A), (B), (C) 센서의 FE-SEM 사진
Fig. 3. FE-SEM images of sensors (A), (B), and (C).

따라 제작된 (A), (B), (C) 센서의 표면을 FE-SEM으로 관찰하여 그림 3에 나타내었다. 산소 처리를 하였을 때와는 달리 질소 처리를 거친 후 산화시킨 면에서는 주석이 2차 성장을 완전히 하지 못한 채 녹다가 산화된

모습을 보인다. 이러한 표면의 차이는 감도값의 차이를 불러 일으킨다. (C) 센서에서는 나노 와이어가 성장한 모습을 확인할 수 있다. 녹는점 보다 높은 온도에서의 열처리 과정 속에서도 기판보다 높은 거칠기를 나타내



(1) XRD result of sensor (B), before oxidation



(2) XRD result of sensor (B), after oxidation

그림 4. (B) 센서의 산화 전 (1), 산화 후 (2)의 XRD 결과
Fig. 4. XRD results of sample (B), before oxidation (1) and after oxidation (2).

고 있고 표면전체를 적시고(wetting)있다. 이러한 표면 거칠기는 가스흡착면적을 높여주어서 가스감도를 높게 된다. 또한 (C) 그림처럼 나노와이어의 성장은 감도 변화에 더 큰 영향을 주게 된다.

그림 4는 질소 처리한 후 산화시킨 (B) 센서의 XRD 분석 결과이다. 산화 전, 즉 질소 처리한 후에는 대부분 주석 상태로 구성되어 있으나 일부 일산화 주석이 측정되었다. 이는 질소 bombe 속의 미량의 산소가 주석과 결합하여 생성된 것이다. 질소 처리는 산화시 형성되는 산화물의 비화학양론적 결합에 영향을 주어, SnO_2 이외의 산화물 즉, SnO , Sn_2O_3 , Sn_3O_4 등의 산화물의 성장을 억제하거나 감소시켜 산화도를 좋게 한다^[41]. 이는 산화후 대부분의 SnO_2 성분이 가스 센싱에 참여하게 함으로써 가스 감도에 좋은 영향을 주게 된다. 산화 후의 XRD 결과에서 보듯이, 대부분이 SnO_2 로 존재하며, 일부 산화되지 못한 주석이 존재하였다. 바닥에 깔린 일부 주석이 산소와 반응하지 못하여 주석 상태로 남아있는 것이다.

(C) 센서에 있어서 나노 와이어의 성장 모습은 온도별로 다르게 나타난다. 그림 5의 온도별 FE-SEM 사진에 따르면, 500 °C일때는 니켈을 머리에 쓰고 올라오기 전의 주석의 모습을 확인할 수 있다. 600 °C에서는 부

분적으로 VLS 법으로 성장한 나노 와이어의 모습을 볼 수 있고, 700 °C가 되었을 때에 나노 와이어가 완전히 성장하게 된다.

센서 (C)의 산화 전, 후의 나노 와이어의 직경을 FE-SEM과 TEM으로 각각 분석하여 그림 6에 나타내었다. 두 그림에서 확인한 결과, 약 35 nm의 직경을 가지고 있으며, 산화 전후의 직경의 변화는 거의 없었다. TEM 사진의 마디 사이의 길은 부분은 니켈로써, 나노 와이어가 성장하는 동안 와이어의 머리에 있다가 와이어가 성장함에 따라 중간에 묻혀서 나타나는 모습이다. 이러한 나노 사이즈의 직경이 가스 감도에 영향을 줄 것이라 생각된다. 이미 잘 알려진 바와 같이 결정립 크기가 작을 수록 특히 수 나노 사이즈에서 급격한 가스 감도의 변화를 나타낸다. 이와 관련하여 나노와이어의 성장은 가스 흡착에 대하여 나노 입자와 유사한 전기 전도 메커니즘을 나타내는 것으로 보여진다.

(A)와 (B) 센서를 황화수소 1 ppm에 대해 350 °C에서 감도를 측정하여 그림 7에 나타내었다. (B) 센서에서 감도가 더 크게 측정되었고, 그래프의 기울기가 급격하게 변하는 것을 통해 반응 속도가 더 빠른 것을 알 수 있다. 하지만 회복 능력은 (A) 센서 보다 시간이 지연되었다. (B) 센서의 회복 능력을 향상시키기 위해서

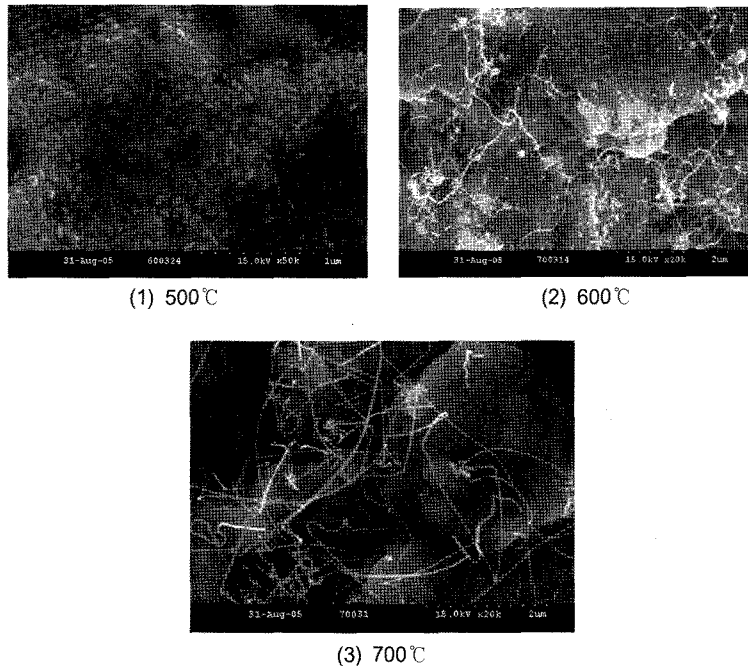
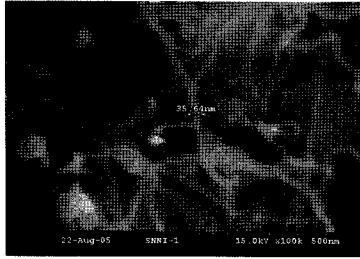
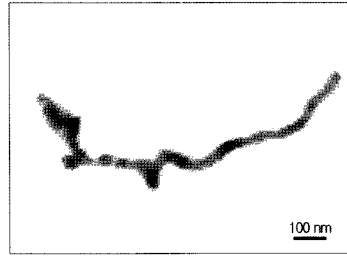


그림 5. (C) 센서의 질소 처리에 따른 온도별 주석 나노 와이어 성장 단계

Fig. 5. Growth step of Sn nanowire, sample (C) in several temperatures heated with N_2 100 sccm for 3 hours.



(1) 주석 나노 와이어, 산화전
(1) before oxidation, Sn nanowire



(2) 산화 주석 나노 와이어, 산화후
(2) after oxidation, SnO₂ nanowire

그림 6. 주석 나노 와이어의 직경 사진: (1) FE-SEM, (2) TEM
Fig. 6. Diameter of SnO₂ nanowire sensor (C): (a) FE-SEM, (b) TEM.

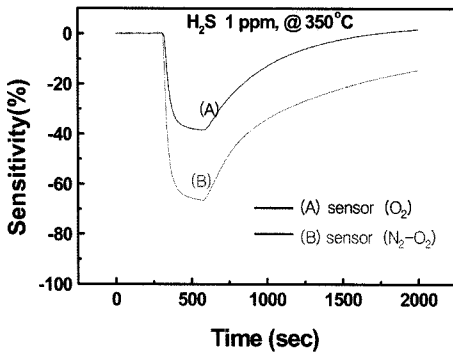


그림 7. 350 °C에서 박막 산화주석 (A), (B) 센서의 황화수소 1 ppm에 대한 감도
Fig. 7. Sensitivities of thin film SnO₂ sensors (A), (B) for 1 ppm H₂S at 350 °C.

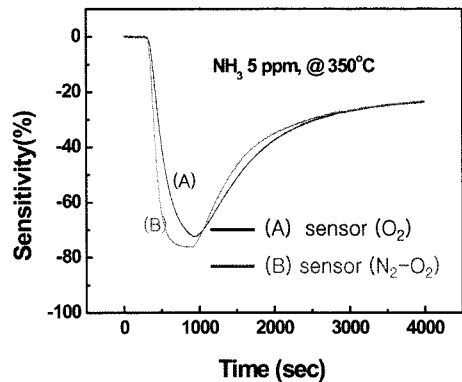


그림 9. 350 °C에서 박막 산화주석 (A), (B) 센서의 암모니아 5 ppm에 대한 감도
Fig. 9. Sensitivities of thin film SnO₂ sensors (A), (B) for 5 ppm NH₃ at 350 °C.

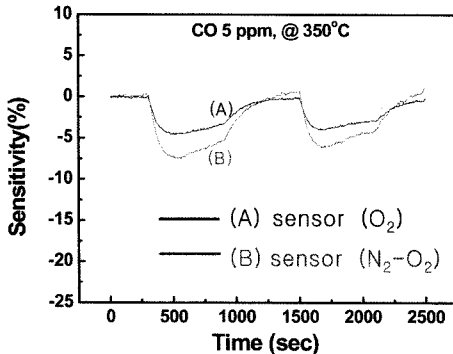


그림 8. 350 °C에서 박막 산화주석 (A), (B) 센서의 일산화탄소 5 ppm에 대한 감도
Fig. 8. Sensitivities of thin film SnO₂ sensors (A), (B) for 5 ppm CO at 350 °C.

는 감도 측정시 작동온도를 350 °C 이상으로 올려서 흡착된 가스 분자의 탈착을 유도하는 방법이 가능하다.

이들 (A)와 (B) 센서의 일산화탄소 5 ppm, 암모니아 5 ppm에 대해 350 °C에서 측정된 감도를 그림 8과 그림 9에 각각 나타내었다. 앞선 황화수소의 경우와 마찬가지로, 질소 처리를 거친 후 산화시킨 (B) 센서가 (A) 센서에 비해 큰 감도와 빠른 반응 시간을 나타내었다. 일산화탄소 5 ppm에 대해서는 두 센서 모두 감도가 10 % 이하의 값을 나타냄으로써, 약한 반응을 보였다. 암모니아 5 ppm에 대한 감도 결과는 두 센서가 비슷한 약 80 %의 값을 나타내는 비슷한 양상을 보였다.

그림 10의 결과에 나타난 바와 같이 (B), (C) 센서를 황화수소 500 ppb에서 측정된 결과, 나노 와이어 센서가 (B) 센서보다 감도가 약 2배로 크게 나타났고, 반응 속도도 훨씬 빠르게 측정되었다. ppb 레벨의 황화수소에 대한 감도가 질소처리를 한 센서와 나노 와이어 센서에 나타남으로써, 저 농도에 대한 고 감도 센서를 실현하였다. 이러한 결과는, 나노 와이어의 네트워크에서

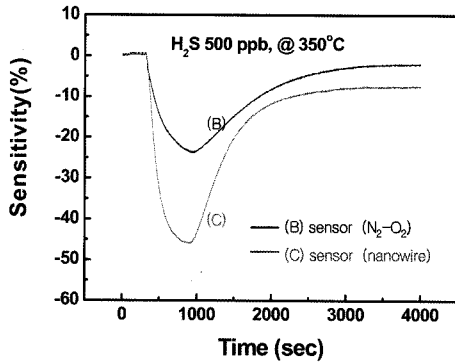


그림 10. 350 °C에서 박막 산화주석 (B) 센서와 나노 와이어 (C) 센서의 황화수소 500 ppb에 대한 감도
Fig. 10. Sensitivities of thin film (B) sensor and nanowire SnO₂ (C) sensor for 500 ppb H₂S at 350 °C.

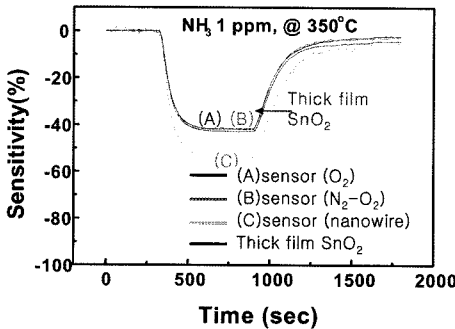


그림 11. 350 °C에서 후막 산화주석 센서, 박막 산화주석 (A), (B) 센서 및 나노 와이어 (C) 센서의 암모니아 1 ppm에 대한 감도
Fig. 11. Sensitivities of thick, thin film (A), (B) sensors, and nanowire SnO₂ (C) sensor for 1 ppm NH₃ at 350 °C.

이뤄지는 접촉점에서의 저항 변화가 감도 및 반응 시간에 영향을 준다는 예측과 동일한 것이라 생각할 수 있다.

그림 11에 암모니아 1 ppm, 그림 12에 일산화탄소 10 ppm에 대해서 350 °C에서 측정된 센서 감도를 각각 나타내었다. 암모니아의 경우, 후막과 (A), (B) 센서는 비슷한 경향의 감도를 보이나 나노 와이어 (C) 센서는 다른 센서들보다 더 큰 감도와 빠른 반응 속도를 보였다. 특히 일산화탄소의 경우, 나노 와이어의 감도가 약 4배 가까이 크게 나타났으며, 반응 속도도 약 2 배로 빨랐다. 나노 와이어 센서가 일산화탄소 10 ppm에 대해서 다른 후막, 박막 센서에 비해 유독 큰 감도를 나타내기 때문에, 일산화탄소에 대해 선택성을 가지고 있다고 말할 수 있다.

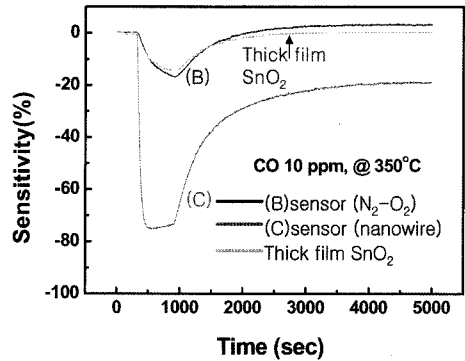


그림 12. 350 °C 에서 후막 산화주석 센서, 박막 산화주석 (B) 센서 및 나노 와이어 (C) 센서의 일산화탄소 10 ppm에 대한 감도
Fig. 12. Sensitivities of thick, thin film (B) sensor, and nanowire SnO₂ (C) sensor for 10 ppm CO at 350 °C.

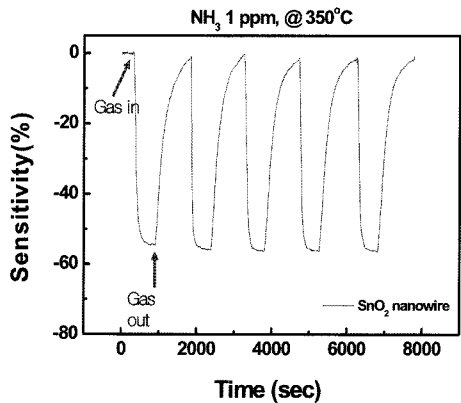


그림 13. 350 °C에서 나노 와이어 (C) 센서의 암모니아 1 ppm에 대한 반복 특성
Fig. 13. Reproducibility of nanowire SnO₂ (C) sensor for 1 ppm NH₃ at 350 °C.

암모니아 1 ppm에 대해 350 °C에서의 나노 와이어 센서의 반복 특성을 그림 13에 나타내었다. 5회에 걸친 측정 가스 주입, 배기를 실시한 결과 감도의 양호한 반복성을 보여준다.

4. 결 론

알루미나 기판에 금속 주석을 열증착법으로 증착시켜 산소 분위기에서 열산화시킨 박막 센서, 질소 처리한 후 산화시킨 박막 센서, 그리고 니켈을 촉매로 사용한 나노 와이어 센서를 황화수소, 일산화탄소, 암모니아 가스에 대해 가스 감응 특성을 조사하였다. 질소 처

리는 산화 반응시 SnO₂를 위주로 산화물을 형성함으로써, 다른 기타 주석 산화물의 생성을 억제하고, 이는 가스 감도에 영향을 준다. 질소 처리한 박막 SnO₂ 센서와 니켈을 이용해 질소 처리로 성장시킨 나노 와이어 SnO₂ 센서는 황화수소에 대해 ppb 레벨의 농도 측정이 가능하였다. 이때의 나노 와이어 SnO₂의 직경은 약 35 nm이다. 질소 열처리로 성장한 나노 와이어 SnO₂ 센서는 황화수소, 암모니아, 일산화탄소에 대해 350 °C의 동일한 온도에서 박막, 후막 SnO₂ 센서보다 감도가 더 크고, 반응속도가 더 빠르다. 또한 암모니아 1 ppm에 대해 좋은 반복 특성을 가진다.

참고 문헌

[1] K. Y. Youl, G. Y. Cha, N. J. Choi, D. D. Lee, J. C. Kim, and J. S. Huh, "Sensing properties of ZrO₂-added SnO₂ for nerve and blister agent", *Journal of the Korean Sensors Society*, vol. 13, no. 5, pp. 323-328, 2004.

[2] N. J. Choi, T. H. Ban, J. H. Kwak, Y. T. Lim, B. S. Joo, J. C. Kim, J. S. Huh, and D. D. Lee, "Thin film gas sensors based on tin oxide for acetonitril", *Journal of the Korean Sensors Society*, vol. 13, no. 3, pp. 218-223, 2004.

[3] C. Xu, J. Tamaki, N. Miura, and N. Yamazoe, "Grain size effects on gas sensitivity of porous SnO₂-based elements", *Sensors and Actuators B*, vol. 3, pp. 147-155, 1991.

[4] G. Martinelli and M. C. Carotta, "Sensitivity to reducing gas as a function of energy barrier in SnO₂ thick-film gas sensor", *Sensors and Actuators B*, vol. 7, pp. 717-720, 1992.

[5] J. D. Choi and G. M. Choi, "Electrical and CO gas sensing properties of layered ZnO-CuO sensor", *Sensors and Actuators B*, vol. 69, pp. 120-126, 2000.

[6] J. L. Solis, S. Saukko, L. Kish, C. G. Granqvist, and V. Lantto, "Semiconductor gas sensors based on nanostructured tungsten oxide", *Thin Solid Films*, vol. 391, pp. 255-260, 2001.

[7] N. Savage, B. Chwiroth, A. Ginwalla, B. Patton, S. Akbar, and P. Dutta, "Composite n-p semiconducting titanium oxides as gas sensors", *Sensors and Actuators B*, vol. 79, pp. 17-27, 2001.

[8] J. W. Dailey, J. Taraci, and T. Clement, "Vapor-liquid-solid growth of germanium nanostructures on silicon", *J. Appl. Phys.*, vol. 96, no. 12, pp. 7556-7567, 2004.

[9] J. Wang, J. Sha, Q. Yang, X. Ma, H. Zhang, J. Yu, and D. Yang, "Carbon-assisted synthesis of aligned ZnO nanowires", *Materials Letters*, vol. 59, pp. 2710-2714, 2005.

[10] D. Calestani, M. Zha, G. Salvati, L. Lazzarini, L. Zanotti, E. Comini, and G. Sberveglieri, "Nucleation and growth of SnO₂ nanowires", *Journal of Crystal Growth*, vol. 275, pp. e2083-e2087, 2005.

[11] S. V. Kalinin, J. Shin, S. Jesse, D. Geohegan, and A. P. Baddorf, "Electronic transport imaging in a multiwire SnO₂ chemical field-effect transistor device", *J. Appl. Phys.*, vol. 98, pp. 044503-1-044503-8, 2005.

[12] Z. W. Pan, S. S. Xie, L. F. Sun, and G. Wang, "Direct growth of aligned open carbon nanotubes by chemical vapor deposition", *Chemical Physics Letters*, vol. 299, no. 1, pp. 97-102, 1999.

[13] C. J. Lee, J. H. Park, and J. Park, "Synthesis of bamboo-shaped multiwalled carbon nanotubes using thermal chemical vapor deposition", *Chemical Physics Letters*, vol. 323, no. 6, pp. 560-565, 2000.

[14] K. Yanagimoto, S. Sunada, K. Majima, and T. Sawada, "Effects of N₂ mixed gas atomization on electrochemical properties of Mm(Ni,Co,Mn,Al)_{0.5} alloy powder", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 372, pp. 208-212, 2004.

[15] E. Atanassova, G. Tyuliev, A. Paskaleva, D. Spassov, and K. Kostov, "XPS study of N₂ annealing effect on thermal Ta₂O₅ layers on Si", *Applied Surface Science*, vol. 225, pp. 86-99, 2004.



윤 광 현 (Kwang-Hyun Yun)

- 2004년 2월 경북대학교 금속공학과 졸업 (공학사)
- 2006년 2월~경북대학교 대학원 금속공학과 석사 졸업
- 주관심분야 : 산화물 반도체를 이용한 화학가스 검지



김 종 원 (Jong-Won Kim)

- 2005년 2월 경북대학교 금속공학과 졸업 (공학사)
- 2005년 3월~경북대학교 대학원 나노과학기술과 석사과정
- 주관심분야 : 나노 구조의 산화물 반도체를 이용한 화학가스 검지



류 기 홍 (Gi-Hong Rue)

- 1999년 2월 부산대학교 대학원 고체물리학(이학박사)
- 2004년~경북대학교 센서연구실 연구원
- 주관심분야 : 가스센서, 나노구조체 응용, 측정시스템



허 증 수 (Jeung-Soo Huh)

- 1983년 2월 서울대학교 금속공학과 졸업(공학사)
- 1985년 2월 서울대학교 대학원 금속공학과 졸업(공학석사)
- 1994년 2월 M.I.T. 전자재료 전공(공학박사)
- 1994년~1995년 인천대학교 재료공학과 전임강사
- 1994년~1995년 KIST 정보전자부 위촉 연구원
- 1995년~현재 경북대학교 금속공학과 부교수
- 2000년~2005년 6월 NRL(국가지정 연구실) 실장
- 주관심분야 : 가스센서, 반도체 공정, 디스플레이, 전도성 고분자