

박막형 WO₃계 가스센서의 NO_x 감도 특성

유 광 수*

NO_x Sensing Characteristics of the WO₃-Based Thin-Film Gas Sensors

Kwang Soo Yoo*

요 약

WO₃에 미량의 Pd 또는 Pt가 첨가된 박막을 이용한 NO_x센서를 제조하였다. WO₃계 박막은 고진공, 저항가열식 evaporator를 이용하여 분위기온도에서 증착한 다음 500°C에서 열처리하였다. 5 ppm의 NO₂가스에 대하여 200°C에서 측정된 가스감도(R_{gas}/R_{air})는 0.5 wt.% Pt-WO₃센서에서 50으로서 최대값을 가졌다.

Abstract

The Pd or Pt-doped WO₃ thin-film NO_x sensor was fabricated. The WO₃-based thin films as a gas-sensing layer were deposited at ambient temperature in a high-vacuum resistance heated evaporator and annealed at 500°C. The gas sensitivity (R_{gas}/R_{air}) to 5 ppm NO₂ measured at the operating temperature of 300°C was 50 (highest sensitivity) for the 0.5 wt.% Pt-WO₃ sensor.

1. 서 론

최근, 산업의 고도화 및 자동화에 따라 센서기술은 모든 산업의 기반기술이 되었으며, 각종 가전제품으로부터 자동차, 의료장비에 이르기까지 그 응용범위가 날로 확대되어 가고 있다. 특히, 환경에 관한 규제가 더욱 강화됨에 따라 환경계측에 관한 센서의 개발이 필요하게 되었다.^{[1]-[3]} 자동차 및 산업체에서 배출되는 가스중 질소산화물(NO_x)은 인체에 매우 유독한 가스로서, 8시간 동안 노출되었을 때 안전기준이 NO₂의 경우 3 ppm, NO의 경우 25 ppm이하이다.^[1] NO_x센서는 크게 0~4,000 ppm 범위의 NO가스가 주성분인 배출

가스 측정 및 제어용과 0~10 ppm 범위의 NO₂가스가 주성분인 대기오염 측정용으로 나눌 수 있다.^[4] 최근들어, NO_x의 배출을 줄이기 위한 노력^[5]과 더불어 NO_x를 수 ppm 또는 1ppm이하의 낮은 농도에서 감지할 수 있는 센서를 개발하기 위한 연구가 병행되고 있다.

지금까지 NO_x센서에 대한 연구는 1990년대 들어서 활발해졌으며, SnO₂, ZnO, WO₃ 등의 단일 혹은 복합 산화물 반도체 센서,^{[6]-[10]} SiC-ZnO 이종접촉 센서,^[11] YBa₂Cu₃O_{7- δ} 초전도체 센서,^[12] 유기물 반도체 센서,^[13] 전기화학 센서^[14] 등이 발표되었다. 그 중에서도 가연성가스와는 달리 NO_x 가스에는 WO₃가 가장 감도가 높은 것으로 나타났다. 벌크(bulk)형 NO_x센서로는 WO₃에 여러 불순물을 첨가한 연구결과가 보고되었으나,^[10] WO₃ 박막을 이용한 NO_x센서에 대해서는 아직까지 촉매 또는 불순물 첨가효과에 대한 연구가 이루어

*서울시립대학교 공과대학 재료공학과
(Dept. of Materials Science & Engineering, Seoul City University)
<접수일자 : 1996년 5월 23일>

어지지 않았다.

본 연구에서는 Pd 또는 Pt를 첨가시킨 WO₃ 박막을 제조하여 그 첨가효과와 실용화 가능성을 조사하는데 주 목적을 두었다. WO₃계 박막은 Pd 또는 Pt가 잘 분산된 WO₃ 펠렛(pellet)을 source로하여 저항가열식 고진공증착법을 이용하여 제조하고 열처리 조건에 따른 박막의 결정성 및 NO_x 감도 특성을 조사하였다.

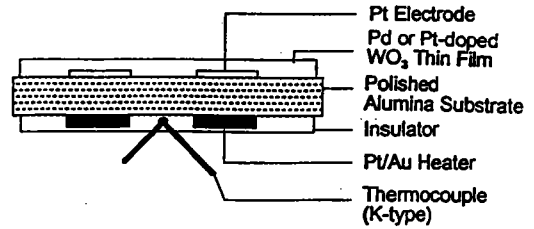
II. 실험 방법

2.1. 센서제조

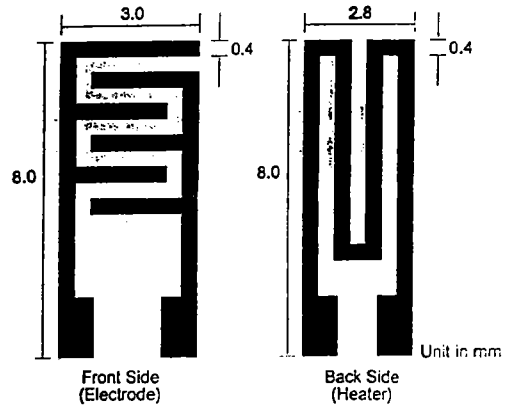
본 연구에서 제조한 박막형 WO₃계 가스센서의 구조는 그림 1(a)와 같다. 기판재료는 박막증착용 알루미늄나(polished alumina)를 사용하였으며, D.C. Sputter (VX-10A, RMC-Eiko Co.)로 10⁻¹ torr의 진공과 챔버 내 분위기온도(ambient temp.)에서 약 2000Å 두께의 Pt 전극을 증착하였다. 이 때 사용한 Pt(99.999%)는 2" φ target이었으며, Pt 증착후에는 박막의 질을 균일화시키고 안정화시키기 위하여 튜브형 전기를 이용하여 질소분위기에서 700°C에서 4시간 동안 열처리하였다. 열처리후에는 화학식각공정을 거쳐 그림 1(b)에 나타낸 것과 같은 패턴을 만들었다. 이 때, 감광제(Photoresist, PR)는 양성감광제 AZ1518을 사용하였으며, 현상액은 AZ351을 사용하였다. 화학식각공정은 다음과 같이 6개 과정을 거쳐 수행하였다.

- PR coating : 4000 rpm, 30 sec.
- Soft bake : 85°C, 15 min.
- Expose : 40 sec. (source : He)
- Developing : (Developer : D.I. Water = 1 : 4)
- Hard bake : 110°C, 30 min
- Etching : 400~500 Å/min (Etchant : 8H₂O + 7HCl + HNO₃)^[15]

히터는 실크스크린 프린팅법으로 알루미늄 기판 뒷면에 Pt/Au 페이스트(Ferro Co.)를 이용하여 그림 1(b)와 같은 패턴의 후막을 형성한 다음 Pt 리드선을 연결한 후, 850°C에서 10분간 열처리하여 제조하였다. Pt/Au 후막위에는 방열 및 절연을 위하여 고온용 알루미늄나 페이스트로 코팅하였으며, 센서의 정확한 온도를 측정하기 위하여 K-type열전대를 부착하였다.



(a)



(b)

그림 1. 박막형 NO_x센서의 구조 :
(a) 단면도, (b) 전극 및 히터의 패턴.

Fig. 1. The structure of thin-film NO_x sensors :
(a) cross section;
(b) patterns of electrode and heater.

표 1. 박막형 WO₃계 NO_x센서의 조성

Table 1. Compositions of WO₃-based thin-film NO_x sensors

| Sample | Composition (wt.%) [*] | | Sample | Composition (wt.%) [*] | |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------|
| | Pd | WO ₃ | | Pt | WO ₃ |
| WO ₃ | 0 | 100 | 0.5Pt-WO ₃ | 0.5 | 99.5 |
| 0.5Pd-WO ₃ | 0.5 | 99.5 | 1.0Pt-WO ₃ | 1.0 | 99.0 |
| 1.0Pd-WO ₃ | 1.0 | 99.0 | 2.0Pt-WO ₃ | 2.0 | 98.0 |
| 2.0Pd-WO ₃ | 2.0 | 98.0 | | | |

* Composition belongs to source materials.

위에서 기술한 바와같이 준비된 기판위에 NO_x 감지막으로 Pd 또는 Pt가 첨가된 WO₃ 박막을 증착하였다. 감지막의 조성은 표 1과 같으며, 이 때 사용된 출발원료는 Cerac Co.의 WO_{2.9}(99.99%), PdCl₂(99.9%), PtCl₂(99.9%)이었다. 표 1의 조성에 따라 Pd 또는 Pt가 첨가된 WO₃ 분말을 마노유발을 이용하여 균일하게 혼합한 후, 결합제로서 10 wt.% PVA 수용액을 0.6 wt.% 첨가하여 일방향 가압성형한 다음, 결합제를 날려보내고 어느정도의 강도를 갖게 하기 위하여 800℃에서 10분간 소성하였다. 이와 같이 준비된 WO₃계 펠렛을 source material로 사용하여, 이미 전극이 형성된 알루미늄 기판위에 2×10⁻⁵ torr의 진공하에서 저항가열식 evaporator를 사용하여 분위기온도에서 WO₃계 박막을 증착하였다. 이 때, 전류는 200 A, 증착속도는 40~50 Å/sec, 두께는 실용화에 충분한 약 20,000 Å의 조건으로 하였다. 이 때, 박막의 두께는 고진공 증착기내에 부착된 Quartz thickness monitor로 조절하였다. WO₃계 박막 증착후에는 박막의 결정성을 향상시키고, 안정화시키기 위하여 공기중, 500℃에서 4시간 동안 열처리 하였다. Pd, Pt 및 WO₃의 승화온도는 각각 992℃(10⁻⁶torr), 1492℃(10⁻⁶torr), 및 980℃(10⁻⁴torr)로서, 이들의 완전 증착을 위해서 약 4 kW의 전력이 필요하였다. 증착된 박막의 조성은 EPMA(JEOL, JXA-8600)분석결과 원래의 조성과 비슷하였다.

2.2. 특성 측정

WO₃계 박막의 결정성을 확인하기 위하여 X-ray Diffractometer(Philips)로 2θ 값이 20°~80° 범위내에서 X-선 회절분석을 하였으며, 미세구조를 주사전자현미경(JEOL, JXA-8600)을 이용하여 관찰하였다.

가스감도측정시스템은 그림 2에 나타낸 바와 같으며, test box는 외부와 완전히 차단하여 가스가 누출되지 않도록 밀폐하였으며, 그 크기는 235×180×210 mm³ (88.8만 mm³)이었다. 가스는 주사기를 이용한 단속주입법으로 NO와 NO₂가스에 대하여 1 ppm 단위로 5 ppm까지 주입하며 NO_x 감도를 측정하였으며, 센서를 중앙에 위치시키고 가스가 test box내부에서 균일하게 분산되도록 소형 fan을 부착하였다. 이 때, 회로전압(V_c)는 d.c. 10 V를 인가하였으며, 히터의 양단에도 d.c.전압(V_H)을 인가하여 자동온도조절기로 센서표면에 위치시킨 K-type열전대와 연결하여 센서의 온도가 정확하게 조절되도록 하였다. 이 때 사용한 전원은

regulated d.c. power supplier (Dynascan Co.)이었다. 이 측정 시스템은 만약의 경우 가스누출로 인한 사고를 방지하기 위하여 특별히 제작한 Fume Hood 내부에 설치하였다.

가스감도측정시 사용된 감지방식은 전압검출법^[16]으로, 이 방법은 센서에 직렬로 연결된 부하저항(Load Resistance, V_{RL})를 읽는 것이다. 센서의 감도특성은 여러방법으로 표시할 수 있겠으나,^{[17]-[19]} 본 연구에서는 대기중에서의 센서 저항값(R_{air})을 기준으로 하여 가스 존재하에서의 저항값(R_{gas})의 비율(R_{gas}/R_{air})로 가스감도를 나타내었다. 이 때, 센서의 저항값은 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$R_s = R_L \left(\frac{V_L}{V_{RL}} - 1 \right) \tag{1}$$

- 여기서, R_s = 센서의 저항값
- R_L = 부하 저항값
- V_c = 회로에 인가한 전압
- V_{RL} = 출력 전압.

가스감도 측정시 사용된 NO_x 가스는 Ar가스로 희석된 2.57% NO와 5% NO₂이었다.

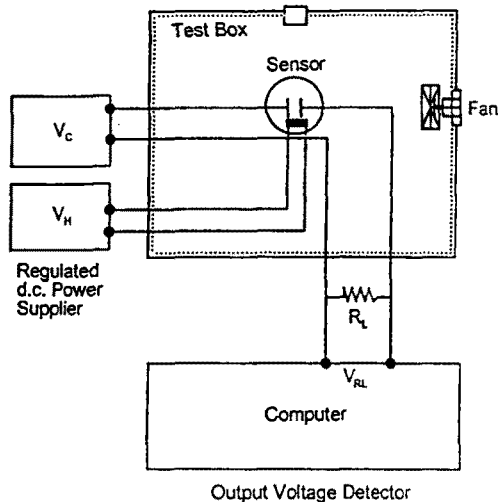


그림 2. 가스감도 측정 시스템의 개략도: V_c: 회로전압, V_H: 히터전압, R_L: 부하저항, V_{RL}: 출력전압.
 Fig. 2. Schematic diagram of the gas-sensing measurement system: V_c: circuit voltage; V_H: heater voltage; R_L: load resistance; V_{RL}: output voltage.

III. 결과 및 고찰

3.1. 기본물성분석

그림 3은 evaporator로 분위기온도(ambient temp.)에서 증착시킨 WO_3 박막(as-deposited film)과 $500^\circ C$ 에서 열처리한 박막의 X선 회절도이며, S로 표시한 큰 peak는 알루미늄 기판에 해당하는 패턴이다. 열처리하지 않은 As-deposited WO_3 박막에서는 알루미늄 기판의 peak만 나타나 WO_3 는 amorphous 상으로 존재함을 알 수 있으며, $500^\circ C$ 에서 열처리하였을 때 WO_3 peak가 나타났다. 텅스텐산화물은 orthorhombic, monoclinic, triclinic 상들이 존재하는 것으로 알려졌는데,^{[20],[21]} 본 연구에서 제조한 WO_3 박막은 orthorhombic phase(JCPDS card no. 20-1324)와 일치하였다. Pd 또는 Pt를 미량첨가한 WO_3 박막의 peak 역시 그림 3(b)와 같았다.

그림 4는 $500^\circ C$ 에서 열처리 전·후의 WO_3 박막과 0.5Pt- WO_3 박막의 SEM사진이다. 열처리전보다 열처리후에 입자의 성장이 관찰되었고, 이러한 입자들이 뭉쳐서 약 $3\sim 5\ \mu m$ 크기의 agglomerated granule로 되어 있으며, Pt를 첨가시킨 박막의 경우에는 granule 내부에 매우 작은 입자가 존재함을 알 수 있다. 이 작은 입자들은 grain boundary 면적을 증가시켜 주어 가스감도를 증가시켜 주는 것으로 나타났다. Pd를 첨가시킨 경우에도 그림 4(c)와 비슷한 미세구조를 가지고 있었다.

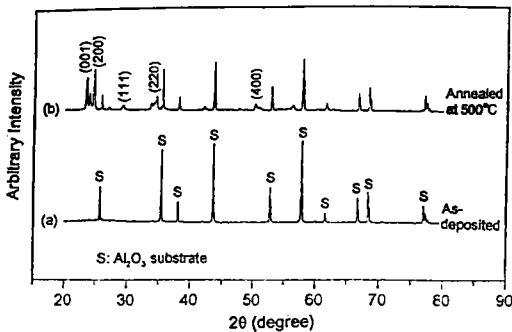
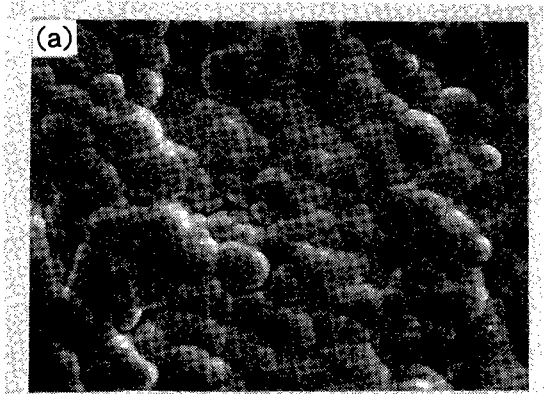
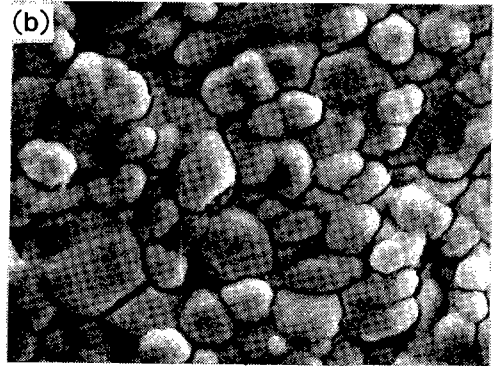


그림 3. 저항가열식 진공증착기로 제조된 WO_3 박막과 $500^\circ C$ 에서 4시간동안 열처리된 WO_3 박막의 X선 회절도.

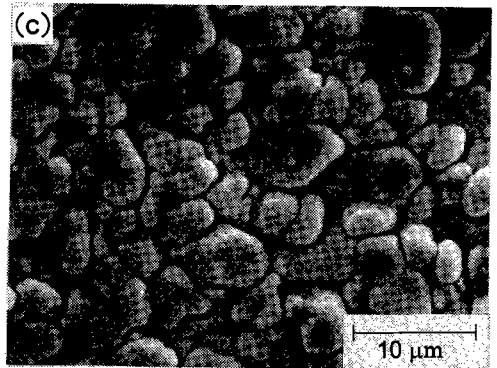
Fig. 3. X-ray diffraction patterns of WO_3 thin films deposited by a high-vacuum resistance heated evaporator and annealed at $500^\circ C$ for 4 hours.



(a)



(b)



(c)

그림 4. $500^\circ C$ 에서 4시간동안 열처리된 WO_3 와 0.5Pt- WO_3 박막의 주사전자현미경 사진 (배율: 2500배).

Fig. 4. Scanning electron micrographs of (a) WO_3 and (b) 0.5Pt- WO_3 thin films annealed at $500^\circ C$ for 4 hours (x2500).

3.2. NO_x 감도 특성

WO₃는 WO_{3-x}로 존재하는 대표적인 n형 산소결핍 산화물 반도체(n-type oxygen-deficiency oxide semiconductor)이다.^[22] NO_x는 H₂, CO, 탄화수소계 가스 등의 환원성가스와 달리 산화성가스, 즉 전자 수용성 가스로서 WO₃와 같은 n형 산화물 반도체에 흡착할 경우에 grain boundary에서 운반자(carrier) 밀도가 감소하여 전기전도도가 감소하고 저항값은 증가한다.^[23] 그림 1과 같은 크기 센서의 공기중 저항-온도 특성은, 순수한 WO₃의 경우 100℃에서 115 kΩ, 200℃에서 39 kΩ이었으며, 0.5Pt-WO₃의 경우에는 100℃에서 83 kΩ, 200℃에서 15 kΩ이었다.

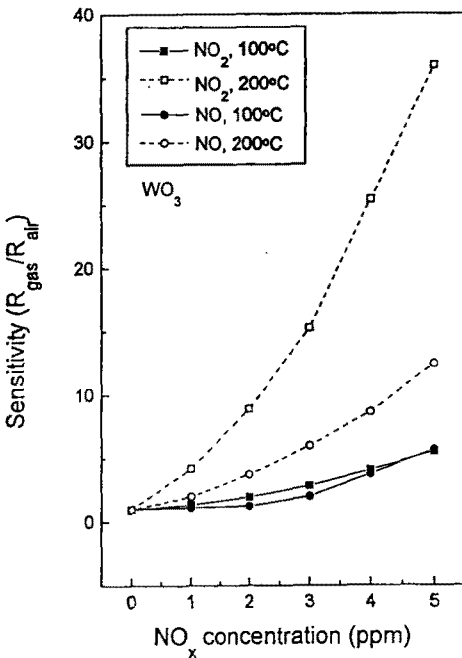
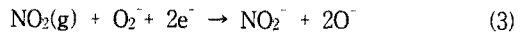


그림 5. 100℃와 200℃에서 측정된 박막형 WO₃ 센서의 NO_x 감도 특성.

Fig. 5. NO_x sensing characteristics of the WO₃ thin-film sensor measured at 100℃ and 200℃, respectively.

그림 5는 WO₃ 박막의 가스감도 측정시 센서의 온도(이하 센서온도라 함)변화에 따른 NO_x감도 특성 측정 결과이다. 센서온도가 100℃보다 200℃에서 감도가 높았으며, 수 ppm 정도의 매우 낮은 농도범위에서 NO₂에

대한 감도가 NO에 대한 감도보다 높았다. NO₂ 5 ppm의 농도에서 가스감도는 36으로서, 이는 WO₃ 박막의 저항이 공기중 저항값에서 36배가 증가하였음을 의미한다. NO₂ 가스중에서 저항값의 증가원인은 n형 산화물 반도체 표면에서 다음과 같은 반응에 의한 가스감지 원리에 의하여 전자의 농도를 감소시킴으로서 전기전도도는 저하하고 저항값은 증가하기 때문인 것으로 알려졌다.^[24]



NO가스는 공기중의 산소와 반응하여 NO₂로 산화하는 경향이 있다. 산화된 NO₂는 식 (2)와 (3)과 같이 반응하며, 미반응 NO는 다음과 같이 반도체 표면에 흡착된다.^[24]

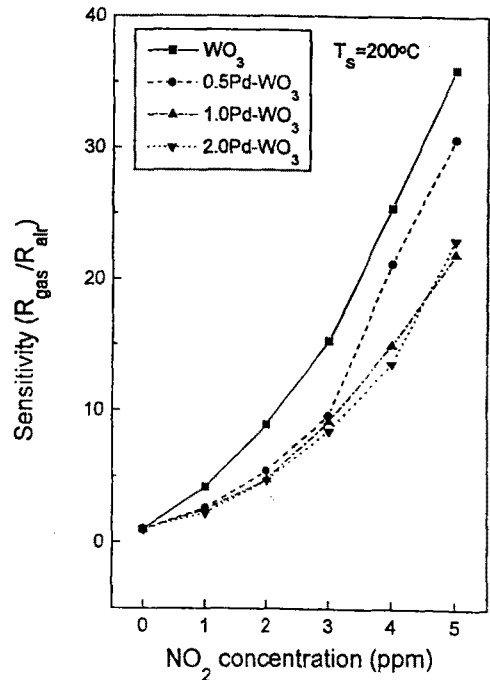
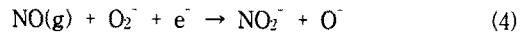


그림 6. NO₂ 농도변화에 따른 박막형 Pd-doped WO₃ 가스센서의 가스감도 특성.

Fig. 6. Gas sensing characteristics of the Pd-doped WO₃ thin-film gas sensor as a function of NO₂ concentration.

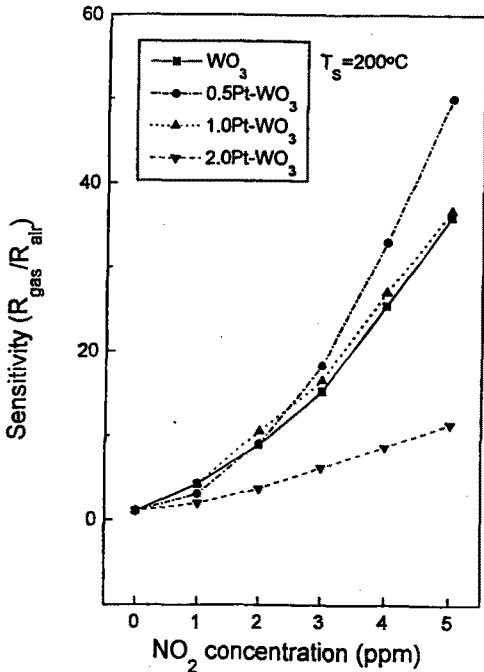


그림 7. NO₂ 농도변화에 따른 박막형 Pt-doped WO₃ 가스센서의 가스감도 특성.

Fig. 7. Gas sensing characteristics of the Pt-doped WO₃ thin-film gas sensor as a function of NO₂ concentration.

그림 6과 7은 WO₃에 각각 Pd와 Pt가 미량 첨가되었을 때 200°C에서 측정된 NO₂ 감도 특성이다. Pd 첨가의 경우에는 순수한 WO₃ 박막센서보다 NO₂ 감도가 감소하였으며, Pd 첨가량이 증가할수록 감도는 더 저하되었다. 그러나, Pt 첨가의 경우에는 0.5Pt-WO₃센서에서 5 ppm의 NO₂감도가 50으로서 가장 높았으며 1.0Pt-WO₃ 센서는 순수한 WO₃ 센서의 감도와 비슷한 값을 가졌으며, 2.0Pt-WO₃ 센서는 순수한 WO₃ 센서의 감도보다 낮은 값을 가졌다. 그 이유는 미량의 Pt는 NO_x 감지시 촉매역할을 하여 감도를 향상시키나, 적정량 이상의 Pt는 센서의 전기전도도를 증가시키는데, 즉 센서 저항값을 감소시키는데 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이 현상과 비슷한 산화물 반도체에 귀금속 촉매를 첨가하면 전기전도도가 증가한다는 보고가 있다.^[25] Pt를 첨가시켰을 때 NO_x 감도가 향상된 또 하나의 이유는 그림 4(c)의 SEM 사진에서 볼 수 있듯이 더 많은 grain boundary가 존재하여, 가스 감도가 증가한 것으로 사료된다.

그림 6과 7의 결과로부터, Pt가 미량 첨가된 WO₃ 박막 가스센서는 향후 장기안전성, 선택성에 대한 연구가 더 이루어져야 하겠으나 가스감도 특성만 고려할 때, 0~10 ppm범위의 NO₂가스가 주성분인 대기오염 측정용 센서로 실용화 가능성이 있는 것으로 생각된다. NO_x가스의 응답특성은 그림 8에서 볼 수 있듯이 1 ppm의 NO₂가스 주입시 예를 보면 약 15초후에 100% 응답특성(saturation)을 나타내고 있다.

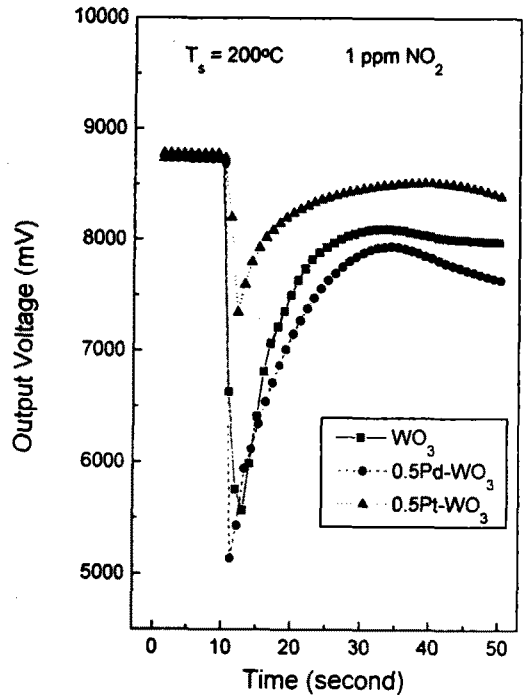


그림 8. 박막형 WO₃계 가스센서의 응답특성.

Fig. 8. Response-time characteristics (output voltage) of the WO₃-based thin-film gas sensor.

IV. 결 론

본 연구에서는 제조가 용이한 고진공 저항가열식 evaporator로 알루미늄 기판위에 Pd 또는 Pt가 첨가된 WO₃박막을 증착한 후 열처리하여 제조한 NO_x센서에 대하여 다음의 결론을 얻었다.

1. X선 회절분석결과, as-deposited WO₃계 박막은 amorphous 상태이었으며, 500°C에서 4시간 동안 열처리하였을 때 orthorhombic phase의 WO₃ 다결정을 얻을 수 있었다.

2. SEM을 이용한 미세구조 관찰결과, 열처리한 후의 박막표면은 작은 입자들이 뭉쳐서 3~5 μ m 크기의 agglomerated granule들을 형성하고 있었으며, Pd 또는 Pt를 첨가시켰을 경우에는 granule내에 매우 작은 입자들이 더 선명하게 나타났다.

3. NO_x 감도특성은, Pd 첨가의 경우에는 순수한 WO₃ 센서보다 감도가 떨어졌으며, Pt 첨가의 경우에는 0.5Pt-WO₃ 센서에서 5 ppm의 NO₂ 감도가 50%로 가장 높았다. Pt를 미량 첨가시 NO₂ 감도가 실용화시킬 수 있는 수준으로 증가한 이유는 귀금속 촉매효과와 미세구조변화때문인 것으로 사료된다. NO_x가스에 대한 100% 응답시간은 약 15초이었다.

감사의 글

본 연구에 많은 도움을 주신 KIST의 김태송박사님, 정중학씨와 서울시립대학교의 오용주군에게 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] N.O. Korolkoff, "Survey of toxic gas sensors and monitoring systems", Solid State Tech., vol. 32, no. 12, pp. 49~64, 1989.
- [2] G. Sberveglieri, "Recent developments in semiconducting thin-film gas sensors", Sensors and Actuators B, vol. 23, pp. 103~109, 1995.
- [3] A.M. Azad, S.A. Akabar, S.G. Mhaisalkar, L.D. Birkefeld, and K.S. Goto, "Solid-state gas sensors: A review", J.Electrochem. Soc., vol. 139, no. 12, pp. 3690~3704, 1992.
- [4] T. Inoue, K. Ohtsuka, Y. Yoshida, Y. Matsuura, and Y. Kajiyama, "Metal oxide semiconductor NO₂ sensor"; in Technical Digest of the 5th Int'l Meeting on Chemical Sensors, Rome, Italy, pp. 490-493, 1994.
- [5] Z.R. Ismagilov and M.A. Kerzhentsev, "Catalytic fuel combustion - a way of reducing emission of nitrogen oxides", Catal. Rev.-Sci. Eng., vol. 32, no. 1/2, pp.51~103, 1990.
- [6] M. Kanamori, Y. Okamoto, Y. Ohya, and Y. Takahashi, "Thickness dependence of sensitivity of SnO₂ film gas sensors", J. Ceram. Soc. Jpn., vol. 103, no. 2, pp. 113~116, 1995.
- [7] S. Matsushima, S. Kunitsugu, K. Kobayashi, and G. Okada, "NO₂ sensing properties of thick Zn₂SnO₄ film", J. Ceram. Soc. Jpn., vol. 103, no. 3, pp. 302~303, 1995.
- [8] U. Lampe, J. Gerblinger, and H. Meixner, "Nitrogen oxide sensors based on thin films of BaSnO₃", Sensors and Actuators B, vol. 26~27, pp. 26~27, 1995.
- [9] S. Matsushima, D. Ikeda, K. Kobayashi, and G. Okada, "NO₂ gas-sensing properties of Ga-doped ZnO thin film", Sensors and Actuators B, vol. 13~14, pp. 621~622, 1993.
- [10] T. Tshihara, S. Sato, and Y. Takita, "New type NO_x sensor based on capacitance change", Jpn. Chem. Sensors, vol. 9 (Supplement B), pp. 153~156, 1993.
- [11] Y. Nakamura, S. Ishikawa, R. Koyoma, and H. Yanagida, "NO_x sensing characteristics of SiC/ZnO heterocontact", J. Ceram. Soc. Jpn., vol. 102, no. 3, pp. 273~279, 1994.
- [12] S. Kudo, H. Ohnishi, T. Matsumoto, and M. Ippommatsu, "NO_x sensor using YBa₂Cu₃O_{7- δ} thin films", Sensors and Actuators B, vol. 23, pp. 219~222, 1995.
- [13] K. Moriya, H. Enomoto, and Y. Nakamura, "Characteristics of the substituted metal phthalocyanine NO₂ sensor", Sensors and Actuators B, vol. 13~14, pp. 412~415, 1993.
- [14] N. Miura, S. Yao, Y. Shimizu, and N. Yamazoe, "Development of high-performanc solid-electrolyte sensors for NO and NO₂", Sensors and Actuators B, vol. 13~14, pp. 387 ~390, 1993.
- [15] C.E. Morosanu, Thin Films by Chemical Vapor Deposition, Elsevier, New York, p. 307, 1990.
- [16] T. Seiyama, "Gas detection by activated semiconductor sensor", Denki Kagaku, vol. 40, no. 3, pp. 244~249, 1972.
- [17] K.S. Yoo and H.J. Jung, "Gas-sensing characteristics of semiconducting materials based on In₂O₃ depending on composition changes", Sensors and Actuators, vol. 12, pp. 285~290, 1987.

- [18] K.D. Schierbaum, S. Vaihinger, and W. Göpel, "Prototype structure for systematic investigations of thin-film gas sensors", *Sensors and Actuators B*, vol. 1, pp. 171~175, 1990.
- [19] T. Oyabu, "Development of tin oxide gas sensor and monitoring system"; in *Proc. of the 2nd int'l Meeting on Chemical Sensors*, Fukuoka, Japan, pp. 12~17, 1983.
- [20] *Handbook of Chemistry and Physics*, 74th ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, p. 4-109, 1993.
- [21] G. Sberveglieri, L. Depero, S. Groppelli, and P. Nelli, "WO₃ sputtered thin films for NO_x monitoring". *Sensors and Actuators B*, vol. 26/27, pp. 89~92, 1995.
- [22] W.D. Kingery, H.K. Bowen, and D.R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 847, 1976.
- [23] J.F. McAleer, P.T. Moseley, J.O.W. Norris, and D.E. Williams, "Tin Dioxide Gas Sensors", *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, vol. 83, pp. 1323-1346, 1987.
- [24] J. Tamaki, M. Nagaishi, Y. Teraoka, N. Miura, N. Yamazoe, K. Moriya, and Y. Nakamura, "Adsorption behavior of CO and interfering gases on SnO₂", *Surface Science*, vol. 221, pp. 183-196, 1989.
- [25] C. Wagner, "The electrical conductivity of semiconductors involving inclusions of another phase", *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 33, pp. 1051-1059, 1972.

 著 者 紹 介



劉光洙 (유광수)

1957년 1월 15일생. 1981년 한양대학교 공과대학 무기재료공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사). 1991년 에리조나주립대학교 재료공학과 졸업(공학박사). 1984년~1987년 KIST 무기재료연구실 연구원, 1991년~1995년 KIST 세라믹스연구부 선임연구원. 1995년~현재 서울시립대학교 공과대학 재료공학과 전임강사.
 주관심분야 : 세라믹박막센서, 전자세라믹스, 고체전기화학.