

논문 2000-9-6-05

In₂O₃ 박막위에 증착된 초박막 촉매가 CO의 검출 감도에 미치는 영향 이혜정^{*,***}, 송재훈^{*}, 권순남^{*}, 김태송^{**}, 김광주^{***}, 정형진^{*}, 최원국^{*}

Effect of Ultra-thin Catalyst Deposited upon In₂O₃ Thin Film on CO Sensitivity

Hye-Jung Lee^{*,***}, Jae-Hoon Song^{*}, Soon-Nam Kwon^{*}, Tae-Song Kim^{**},
Kwang-Ju Kim^{***}, Hyung-Jin Jung^{*}, and Won-Kook Choi^{*}

요약

CO 가스 감지를 위한 두께 500-600 nm In₂O₃를 기저 물질로한 박막센서를 rf magnetron 방법을 이용하여 제작하였다. CO가스에 대한 감도 향상 및 -CH가 포함된 탄화수소 가스들과의 선택성을 높이기 위해 전이 금속인 Cobalt 촉매를 rf sputtering을 이용하여 초박막 형태로 0.7-2.8 nm 까지 두께를 조절하여 증착하고 500°C 열처리 후 가스 감도 특성을 조사하였다. CO에 대한 감도는 Co 두께 2.1 nm, 작동온도 350°C 에서 가장 우수하였고, 350°C~400°C, Co (1.4 nm) 에서 C₃H₈ 에 대한 감도가 우수함을 알 수 있었다. 광전자 분석법 (x-ray photoelectron spectroscopy;XPS)을 통하여 초박막 Co가 표면이 Co₂O₃가 덮여진 CoO 형태로 존재함을 알 수 있었고, (n-type)In₂O₃-(p-type)CoO 의 p-n junction 이 형성되었음을 확인하였다. 이러한 p-n junction type 가스 센서에는 접합 경계면에서 형성된 전하 공핍층 (depletion layer)의 두께 변화에 따른 저항 변화에 의해 환원성 가스에 대한 감응 기구 (sensing mechanism) 를 설명할 수 있었다.

Abstract

In₂O₃-based thin film sensor with 500-600 nm thick was fabricated for the detection of CO gas by rf magnetron sputtering. In order to improve both sensitivity to CO gas and selectivity to hydrogen gas containing -CH, ultra-thin transition metal Co catalyst was sputtered over In₂O₃ thin film and annealed at 500°C. Sensitivity to CO was maximum at the thickness of Co 2.1 nm and 300°C, and that to C₃H₈ was at the thickness of Co 1.4 nm and 350-400°C. From the x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) result, ultra-thin Co was existed into CoO covered with Co₂O₃ on In₂O₃ particles, and thus p-n junction of In₂O₃(n-type)-CoO(p-type) was thought to be formed. In this p-n junction type sensors, sensing mechanism with reducing gases can be explained by the variation of depletion layer thickness formed in the interface.

1. 서론

산업혁명이후 산업계의 발전에 따라 그 부산물인 유독가스에 의한 대기오염이 부각되었고, 또한 대기오염의 주된 원인중의 하나는 자동차의 배기가스이다. 배기가스의 주성분으로는 미연소 탄화수소 (CH_x), 질소산화물 (NO_x), 일산화탄소 (CO) 등이며 분진이나 황산화물 (SO_x) 도 소량 존재한다. 이러한 유해가스를 제어하기

* 한국과학기술연구원, 박막기술연구센터 (Korea Institute of Science and Technology, Thin Film Technology Research Center)

** 한국과학기술연구원, 마이크로시스템연구센터 (Korea Institute of Science and Technology, Microsystem Research Center)

*** 건국대학교, 물리학과 (KonKuk University, Department of Physics)

<접수일자 : 2000년 8월 16일>

위하여 여러 가지 가스센서들이 연구 개발되고 있다.

가스센서의 종류에는 고체전해질을 이용한 전기화학센서^[1], $YBa_3Cu_3O_{7-x}$ 박막을 이용한 초전도체센서^[2], 산화물 반도체 박막 센서나^[3] 탈로시아닌 같은 유기물 반도체를^[4] 사용하여 SAW 특성을 이용한 센서, 접촉 연소식 센서, 열전도식 가스센서 등이 있다. 가스센서 종류 중 하나인 반도체식 가스센서는 전기저항의 변화를 이용한 가스센서로 가스 감응부에 SnO_2 ^[5], ZnO ^[6], WO_3 ^[7-9], In_2O_3 ^[10-11]와 같은 산화물 반도체 등을 이용하여 가스성분의 흡착에 따라 가스 감응부의 전기저항이 감소하는 것을 이용한 것이다. 센서의 외형에 따라 크게 벌크형, 후박형, 박막형으로 나누어진다. 초기의 센서는 벌크형태가 주종을 이루었으나 센서가 소형화되는 추세에 따라 현재는 후박형과 박막형으로 연구가 진행되고 있으며 후박을 형성시키는 공정으로는 스크린 프린팅법이 일반적이고, 박막증착법으로는 화학 기상 증착법(CVD), sputtering법, sol-gel법 등이 주로 이용되고 있다. CO 센서가 발달함에 따라 저농도의 CO 가스에 대한 감도를 높이는 것 뿐 만 아니라, H_2 , 탄화수소, 수증기등의 여러 가지 공존 가스들에 대한 CO의 선택성(selectivity)을 개선하는 것이 주요한 문제이다.

최근 Yamaura 등의^[12] 보고에 따르면 In_2O_3 반도체 가스센서의 CO와 H_2 의 감도비는 알칼리 금속을 첨가함으로써 크게 증가될 수 있었다고 보고하고 있다. In_2O_3 에 미량의 Rb탄산염(Rb_2CO_3)을 분산(dispersion)시키거나, 미량의 Rb를 첨가하여 제작된 센서의 경우, $300^\circ C$ 에서 CO 가스에 대한 감도가 매우 증가하는 것을 관찰하였고, 또한 H_2 에 대한 감도는 CO가스에 비하여 10%정도 값만을 나타내게 되어 그 탄화수소계열 가스에 대한 선택성이 매우 우수한 가스 센서를 제작하였다고 보고하고 있다. 또한 In_2O_3 에 전이금속(transition metal)의 첨가는 알칼리 금속이 첨가된 센서에 비하여 그 작동 온도를 더욱 낮추는 효과도 보고하였다. Co (0.5-wt %)를 첨가하면 Co 촉매가 반응 가스들과의 산화 온도를 낮춤으로서, $200^\circ C$ 에서 CO 가스에 대한 감도가 우수한 조건을 찾아내었고 Co 첨가 후 Au(0.04-wt%)의 첨가로 작동 온도 $250^\circ C$ 에서 CO 감도 특성 과 H_2 에 대한 선택성이 더욱 향상되는 사실이 보고되었다.^[13] 이러한 알칼리 및 전이 금속의 첨가는 산화 반응을 통하여 Rb-, Co-산화물을 형성되어 전기적으로 p-형의 반도체 성질을 띠게 되고 모물

질인 n-형 반도체의 성질을 가지는 In_2O_3 와 p-n 접합(junction)을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 p-n junction 계면에서 발생하는 전하 공핍층(depletion layer)에 의해 표면 저항이 증대하다가 환원성 가스와 반응 후 그 두께의 변화로 인한 저항 변화가 곧 가스 감도를 결정하는 반응 기구로 설명하고 있다.

본 연구에서는 In_2O_3 를 기저 모물질로 하는 CO 가스 센서에서 Co 촉매의 역할을 알아보았다. 본 연구에서는 Mizsei^[14], Choi^[15] 등에 의해 보고된 바와 같이 초박막(ultra-thin) Pd 촉매 등의 표면 흡착을 이용하면, SnO_2 반도체 가스 센서 등의 가스 선택성, 응답 특성등을 향상시킬 수 있고 이때 초박막의 두께 및 화학적 상태가 가스 감도에 미치는 역할등에 대한 연구를 따라서 초박막 Co의 두께 및 작동 온도, 산화상태등을 조절 하여 CO 및 C_3H_8 가스에 대한 센서 특성을 조사하였고, 그 반응 기구에 대하여 알아보았다.

2. 실험방법

2.1 센서 시료 제작

본 실험에서는 In_2O_3 와 Co 초박막을 rf sputtering 법을 이용하여 증착하였다. 실험에서 사용된 기판은 크기 $5 \times 10 \text{ mm}^2$ 알루미늄 기판 위에 히터와 전극패턴을 형성시켰다.

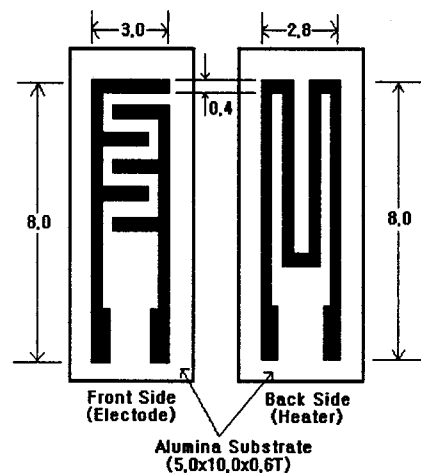


그림 1. In_2O_3 센서용 기판 크기 및 IDT(앞면) 모양과 heater(뒷면)

그림 1을 보면 앞면에는 rf sputtering법으로 Pt을

두께 약 150 nm~200 nm 정도 증착시켰고, 뒷면은 Pd/Ag paste screen printing 한 후 850°C에서 30분 동안 공기중에서 열처리한 후 양면 모두 Pt wire를 연결하였다. In₂O₃ 박막의 경우 직경 2인치 target (Pure Tech: 순도 99.99%) 을 사용하였고 target과 기판사이의 거리를 5 cm로 일정하게 유지하며, 기본 진공도 3×10^{-6} torr에서 실험하였다. rf power는 80 W과 100 W, 아르곤과 산소의 비를 각각 1:1, 4:1로 유지하면서 진공도 2×10^{-2} torr에서 한시간 동안 상온에서 In₂O₃ 박막을 증착하였다.

초박막 Co 을 촉매로서 사용하기 위해 역시 직경 2인치 target을 사용하였고, ex-situ로 In₂O₃ 박막을 위에, rf power 50 W에서, 아르곤만을 유입하여 5×10^{-2} torr에서 0.7~2.8 nm (10분~40분) 까지 상온에서 각각 증착하고 500°C에서 공기중에서 열처리한 후 센서 특성을 조사하였다.

2.2 측정방법

증착된 In₂O₃ 박막의 결정성을 알아보기 위해 100~500°C까지 각각 1시간 동안 공기중에서 열처리를 하여 x-ray diffractometer로 분석하였다. Scanning electron microscope (SEM)를 이용하여 In₂O₃ 박막의 표면 구조를 분석하였다. 감도 측정을 위한 가스는 주사기를 이용한 단속 주입법을 이용하였다.

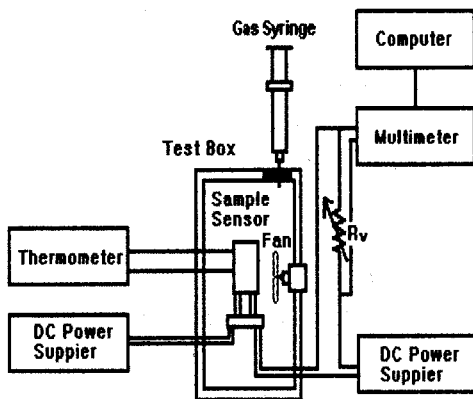


그림 2. 가스 sensitivity 측정 장치의 개략도

그림 2에서 보는 것과 같이 test box는 외부와 차단되게 제작되었다. 크기는 235×180×210 mm 이고, sample은 test box 중간에 위치시켰으며 가스 주입 후 가스 농도를 균일하게 유지시키기 위해 팬을 부착시켰

다. CO 가스 250 ppm 과 C₃H₈ 가스 5000 ppm을 주입하였다. 가스감도 측정시 사용된 감지방식은 전압검출법이며, 센서에 직렬로 연결된 부하저항을 사용하여, 센서의 저항이 변화하면 부하저항에 걸리는 전압이 변화하므로, 이 부하저항에 나타나는 전압변화를 읽는 방법이다. 그림 2에서 회로전압은 5V d.c 전압을 인가하여 센서의 저항 R_s를 구하였다. 본 실험에서 센서의 감도특성은 대기중에서 센서의 저항값(R_a)을 기준으로 하여 측정가스의 농도상태에서의 저항값(R_g)의 비율 (R_a/R_g)로 가스감도를 나타내었다. 또한 sample의 동작 온도는 sample 뒷면의 히터 양단에 d.c 전압을 인가하여 알아보았다. 또한 박막의 화학적 조성 분석과 Co 초박막의 화학적 상태를 알아보기 위하여 x-ray photoelectron spectroscopy (XPS:PHI 5600) 표면 분석 실험을 하였다.

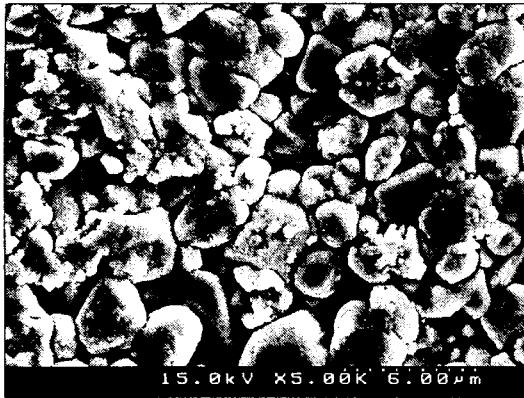
3. 실험결과 및 고찰

3.1 In₂O₃박막의 결정성과 표면 구조

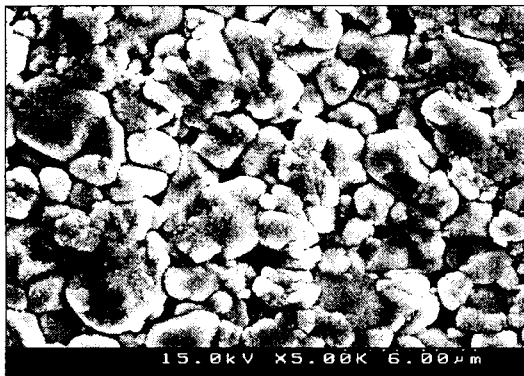
그림 3(a)은 rf sputtering법에 의해 rf power 80 W, 100 W, 아르곤 산소의 비는 1:1, 4:1의 4가지 조건에서 증착한 박막의 XRD 측정결과이다. (440) 피크를 보면 80 W보다는 100 W에서 intensity가 더 크고, 80 W에서 볼 수 없었던 (211) 피크가 100 W에서 확인되었다. 그림 3(b)와 3(c)는 100 W, 아르곤 산소 비가 1:1, 4:1의 조건에서 온도를 변화시키면서 열처리후 XRD 측정 결과이다. 상온에서 (222) 피크는 열처리 온도가 증가함에 따라 피크의 intensity는 증가하고, 상온에서 보이지 않던 (440) 피크가 열처리후부터 확인할 수 있고, 300°C 이상에서는 (211) 방향으로도 성장하였다. 측정결과를 보면 (211), (222), (332), (440) 방향의 In₂O₃ 피크가 나타나는 것으로 보아 다결정 박막임을 알 수 있고, bulk In₂O₃ 와 같이 (222) 방향으로 preferred orientation을 보이고 있다. 두 조건에서 큰 차이는 보이지 않았고, 모두 500°C 열처리 후에 결정성이 bulk에 가깝게 성장됨을 알 수 있었다.

그림 4는 In₂O₃ 박막을 500°C에서 열처리한 후 얻은 SEM 표면 사진이다. 그림 4(a)는 Co 촉매가 없는 경우이고 4(b)의 경우 Co가 2.1 nm 증착되어 있는 경우이다. 두 표면 사진을 비교하면 Co 증착으로 인해 grain boundary등이 약간 매끄러워진 것 처럼 보이는

것 이외에는 grain 크기의 변화나 표면 형상등의 차이는 거의 없었다.

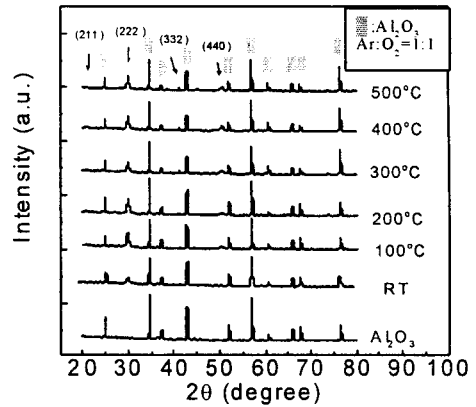


(a)

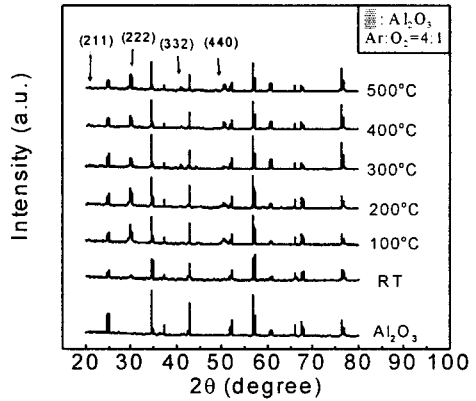


(b)

그림 3. SEM 표면 사진; (a) In₂O₃ 박막 (b) In₂O₃ 박막위에 Co가 증착된 경우

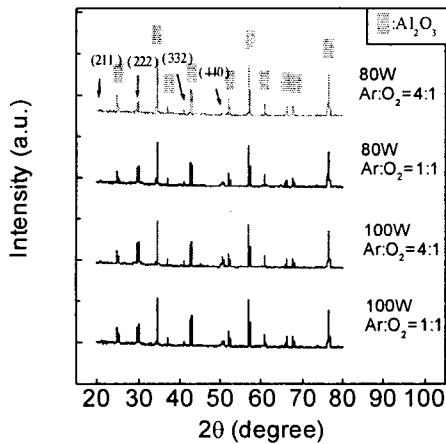


(b)



(c)

그림 4. (a) rf power 80, 100 W, Ar:O₂=1:1, 4:1에서 제작된 In₂O₃ 박막의 x-선 회절 패턴, (b) rf power 100 W, Ar:O₂=1:1에서 온도에 따라 제작된 In₂O₃ 박막의 x-선 회절 패턴, (c) rf power 100 W, Ar:O₂=4:1에서 온도에 따라 제작된 In₂O₃ 박막의 x-선 회절 패턴



(a)

3.2 XPS 측정결과

그림 5는 In₂O₃ 박막 자체, 상온과 500°C에서 열처리된 Co/In₂O₃ 각각의 박막에 대한 In 3d, O 1s, Co 2p core-level에 대한 x-ray photoelectron spectra 측정 결과이다. Spin-orbit coupling에 의해 분리된 In 3d peak은 443.9 eV (3d_{5/2}) 와 452.3 eV (3d_{3/2}) 의 결합에너지 (binding energy; BE) 에 위치한다. In₂O₃인 경우에는 In 3d_{5/2} 의 결합에너지가 444.7±0.1 eV 정도로 알려져 있고, In⁰와 In³⁺사이의 BE 차이는 약 1 eV 정도이다.^[16-18] Co⁰ 2p_{3/2}의 core-level은 778.1eV에서 찾을

수 있고, Co-O(CoO 또는 Co₂O₃/Co₃O₄)는 약 2 eV 정도 높다고 알려져 있다.¹¹⁹⁻²⁰¹ 그림 5(a) Co 흡착과 500°C 열처리 후에 In 3d는 낮은 BE 방향으로 움직인다. In₂O₃는 ZnO와 SnO₂와 같이 n-type 반도체이고, 참고 문헌에 따르면 Rb₂CO₃(p-type)-In₂O₃(n-type)에서의 In 3d의 피크는 낮은 BE 방향으로 이동하는 것을 관찰하였고, 이동되어지는 크기는 첨가되는 Rb의 양에 따라서 변화된다. 따라서 p-type 반도체로 알려져 있는 CoO의 형성이 이루어지고, 이에 따라 Rb₂CO₃의 혼합과정과 같은 결과가 관찰되고 있다.²¹¹

그림 5(b)에서 Co가 흡착되지 않은 In₂O₃의 경우 530.2 eV에서 나타나는 peak은 In₂O₃의 In-O 결합에 의한 것이고 좀더 높은 BE (532.2 eV)(화살표 표시)에서 보이는 peak은 slight sputtering 으로 사라지는 것로부터 -OH, 또는 흡착된 산소에 의한 것으로 고려된다. 한편 Co 흡착된 In₂O₃ 박막과 500°C 열처리후의 박막의 O 1s 피크 역시 529.6 eV와 531.2 eV에 위치한 두 개의 피크를 볼 수 있다. 전자는 Co 산화물(CoO 또는 Co₂O₃), 후자는 Co-O와 산소의 작용 때문으로 보여진다.¹¹⁹¹

그림 5(c)는 Co 흡착된 것과 500°C 열처리후의 Co 2p core-level 스펙트라를 보여준다. 주피크인 2p_{3/2}는 780.2 eV 주위에 위치하며, Co-O 결합의 결과로 알려져 있다. 4.6 eV~5.6 eV 만큼의 높은 에너지를 가지는 두 개의 인접한 피크들은 많은 전자들의 여기 (multi electron excitation) 즉 shake-up 현상에 의한 satellite peak으로 알려져있다. Satellite peak는 금속 Co가 아닌 코발트 산화물에서 발견되는 것으로, 높은 스핀 상태의 Co²⁺ 이온에서 보여진다. 문헌에 따르면 Co(II)는 낮은 스핀 (²D) 상태보다 높은 스핀 (⁴F) 상태에서 satellite peak을 보이지만 반자성체인 Co(III)에서는 발견되지 않는다고 알려져 있다.²²¹ 두 경우 as-received 시료의 경우 satellite peak이 잘 드러나지 않다가 약간의 Ar⁺ ion sputtering 후 satellite peak이 확연히 드러나고 있음을 알 수 있다. Co 2p에 대한 XPS 결과로부터 500°C 공기중에서 열처리된 Co/In₂O₃의 경우 초박막Co는 Co₂O₃로 표면이 둘러싸여진 CoO 산화물 형태로 In₂O₃ 표면에 분산되어 존재하는 것으로 설명되어질 수 있다. 이러한 결과는 Co의 산화과정에 대한 Kim등의¹¹⁹¹ 결과와도 일치하고 있다. 또한 주목할 만한 사실은 상온에서 단지 Ar 플라즈마로만 스퍼터되어진 금속 Co의 경우도 산화가 진행되어 Co 산화온도 및

산화 기구에 대한 좀더 자세한 연구가 필요하다고 생각된다.

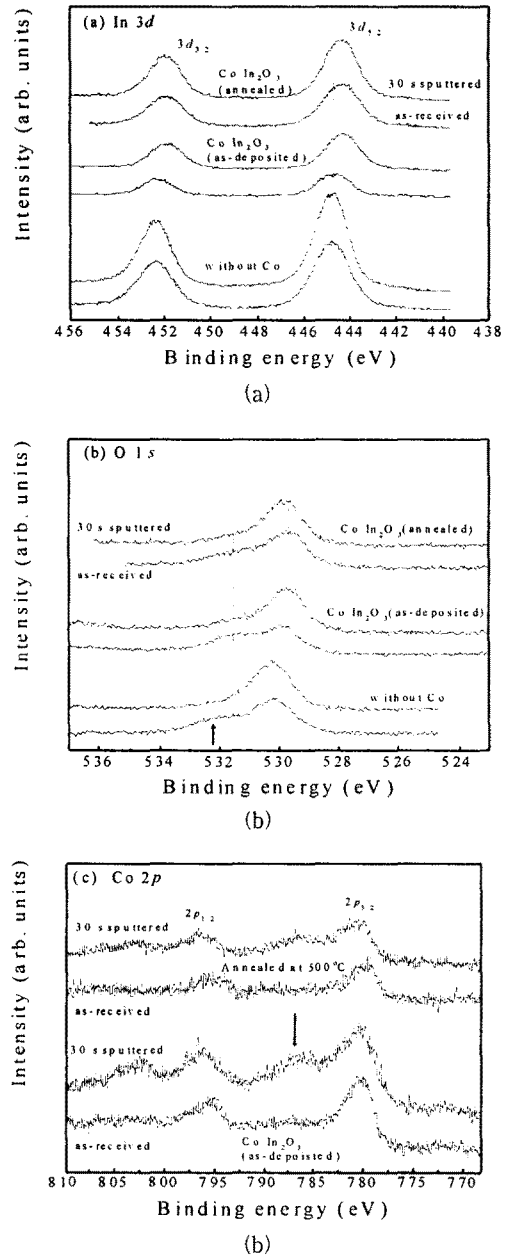


그림 5. 광전자 분석 스펙트라, (a) In 3d core-level(아래로부터, 초박막 Co 흡착되지 않은 In₂O₃, as-received Co/In₂O₃, 500°C 열처리 된 Co/In₂O₃), (b) O1s, 그리고 (c) Co 2p(as-received Co/In₂O₃, 500°C 열처리 Co/In₂O₃) [각각의 곡선에서 아래 것은 as-received, 위의 것은 30 s sputtered된 상태에서 취한 spectral].

이상에서 보면 Co/In₂O₃ 계 (system) 는 n-type In₂O₃ 위에 p-type을 알려진 Co-산화물이 형성되어, 일종의 p-n 접합층이 생성된 계로서 결과적으로 접합면상이에 전하 공핍층 (depletion layer)이 만들어지는 p-n 접합의 종류로 구분된다고 볼수 있다.

3.3 In₂O₃박막의 CO에 대한 감도 측정

CO 가스에 대한 감도는 In₂O₃ 박막의 두께에 의존하며 150 nm의 두께에서 가장 큰 감도를 보였다고 보고된바 있다.^[23] 박막형태의 센서에서 가장 높은 감도를 보이는 임계 두께가 존재하지만 물질 종류, grain size, 가스 종류 등에 의해서도 감도는 변할 수 있다. 본 연구에서는 센서의 내구성과 관련하여 두께에 대한 센서 감도 특성 손실을 배제하고, 센서의 내구성을 주안점으로 하여 기본물질인 In₂O₃ 박막의 두께를 500~600 nm 정도로 증가시켰다.

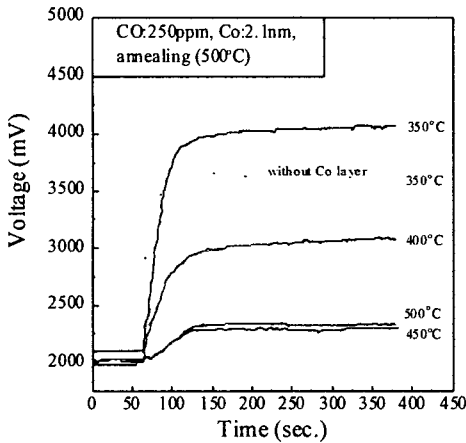


그림 6. Co (2.1 nm)/In₂O₃ 센서의 CO 가스에 대한 반응 곡선(온도 350~500°C)

그림 6은 Co (2.1nm)-In₂O₃ 박막에서 CO 가스 250 ppm, 동작온도 350~500°C에서 측정된 반응 특성 곡선이다. 동작온도 250°C 아래의 온도에서는 전압의 변화를 볼 수 없었고, 동작온도 300°C에서는 아주 작은 변화가 나타났다. 그러나 동작온도 350°C에서 출력되는 전압이 크게 증가하였고, 빠른 반응속도 ($\tau=30$ s)를 보였다. 그리고 동작온도 400°C 이하에서는 다시 출력 전압이 감소하였고, 400°C 이상에서는 그 값이 포화되었다.

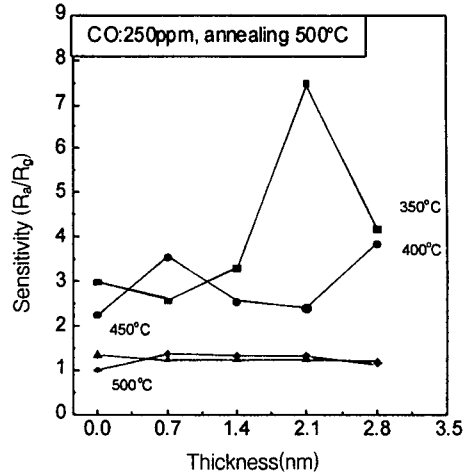


그림 7. Co 초박막 두께에 따른 Co/In₂O₃ 센서의 CO 가스에 대한 반응 곡선 (온도 350~500°C)

그림 7은 Co 초박막의 두께 및 센서의 작동 온도에 따른 CO 가스에 대한 감도 변화 보여 주고 있다. 250°C 미만, 450°C 이상에서는 Co 두께에 관계 없이 CO 가스에 대한 감도의 변화를 관찰 할 수 없었다. 하지만 그림 6에서와 같이 350~400°C 영역에서는 CO 가스에 대한 센서의 응답을 관찰 할 수있었고 가장 높은 감도를 보이는 조건은 작동온도 350°C, 두께 2.1 nm Co에서 S=7.5를 보여주고 있다.

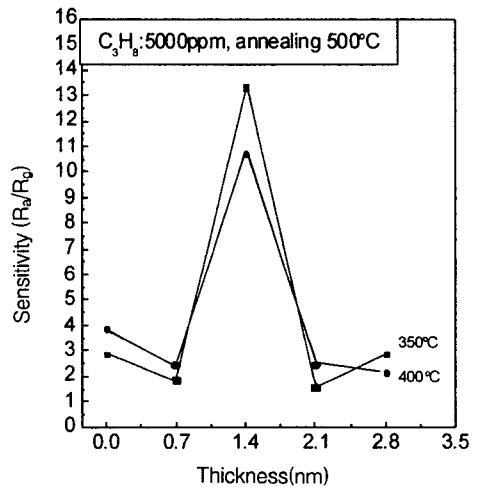


그림 8. Co 초박막 두께에 따른 Co/In₂O₃ 센서의 C₃H₈ 가스에 대한 반응 곡선 (온도 350~500°C)

이에 비하여 C₃H₈의 경우는 열처리전에서는 Co

박막 1.4 nm에서 가장 좋은 감도를 보였으며 동작온도 350°C ~ 400°C에서 높은 감도를 나타내었다.(그림 8)

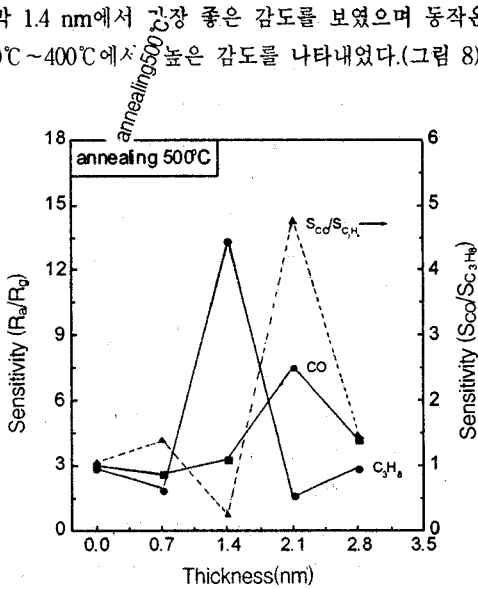


그림 9. Co/In₂O₃ 센서의 CO, C₃H₈ 가스에 대한 반응 곡선 및 선택비

그림 9에서 보면 CO 가스의 경우는 500°C 열처리 과정 후, Co 박막 2.1 nm, 동작온도 350°C에서 7.5 정도의 가장 높은 감도를 나타내었으며, C₃H₈ 가스의 경우에도 열처리 후, Co 박막 1.4 nm, 동작온도 350°C에서 13.36의 가장 높은 감도를 보였다. 또한 같은 조건에서 동작온도 400°C에서 10.76의 감도를 나타내었다. 이상으로 부터 In₂O₃ 박막은 CO 가스와 C₃H₈ 가스의 경우 Co 박막의 두께 차이뿐 아니라 동작온도에서도 선택성을 가지는 hybrid형의 In₂O₃ 센서를 제작할 수 있는 조건을 확립할 수 있었다.

3.4 p-n junction type gas sensor

이상의 결과로부터 그림 10과 같이 n-type In₂O₃ particle 위에 분산된 p-type Co-oxide에의 경계면에서 형성된 depletion layer의 폭이 공기중에는 증가하여 센서의 저항값이 커졌다가 환원성 가스들과의 화학작용 이후 공핍층의 두께가 감소하여 저항값이 작아짐으로 이러한 공핍층의 두께 변화에 의해 가스의 감도가 결정되는 CuO-SnO₂^[24]와 같은 p-n junction type 가스 센서임을 알 수 있다. 한편 CO 가스 및 -CH가 포함된 가스에 대한 Co 촉매의 화학반응에 대하여는 여러 가지 가스의 분압 및 온도에 따라 좀더 자세한 연구가 필요하다고 본다.

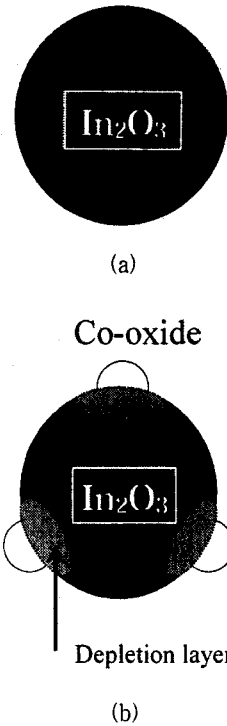


그림 10. CoO-In₂O₃ p-n type 센서의 전하 공핍층 형성 모델

4. 결 론

CO 가스를 감지하기 위한 가스센서로서 사용되어진 In₂O₃의 감도는 전이 금속 초박막 Co를 증착 및 열처리 후에 감도가 증가하는 것을 확인하였다. C₃H₈ 가스와 선택성에서는 동작온도의 변화와 Co 초박막의 두께에 따라서 선택성을 보였다. 광전자 분광법을 이용하여 열처리된 Co초박막의 화학적 상태가 Co₂O₃가 표면을 덮고 있는 CoO의 상태로 존재함을 알 수 있었고 따라서 CoO(p-type)-In₂O₃(n-type) junction type 가스 센서 형태임을 확인하였다. 이러한 p-n junction 가스 센서의 가스 감응 기구는 p-n 접합의 공핍층 생성과 환원성 가스의 화학작용 이후 변화된 공핍층 두께 변화로 설명할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] N. Miura, S. Yao, Y.shimizu and N. Yamazoe,

- "Development of High Performance Solid-electrolyte Sensor for NO and NO₂", *Sensors and Actuators B*, 13-14, pp. 387-390, 1993.
- [2] S. Kudo, H. Honishi, T. Matsumoto and M. Ippomatsu, "NO_x Sensor using YBa₂Cu₃O_{7-δ} Thin Films", *Sensors and Actuators B*, 23, pp. 219-222, 1995.
- [3] V. I. Anisimkin, M. Penza, A. Valentini, F. Quaranta and L. Vasanelli, "Detection of Combustible Gases by Means of a ZnO-on-Si Surface Acoustic Wave (SAW) Delay Line", *Sensors and Actuators B*, 23, pp. 197-201, 1995.
- [4] K. Moriya, H. Enomoto and Y. Nakamura, "Characteristics of the Substituted Metal Phthalocyanine NO₂ Sensor", *Sensors and Actuators B*, 13-14, pp. 412-415, 1993.
- [5] J. Santos, P. Serrini, B. O' Berrin and L. Manes, "A Thin Film SnO₂ Gas Sensor Selective to Ultra-Low NO₂ Concentrations in Air", *Sensors and Actuators B*, 43, pp. 154-160, 1997.
- [6] S. Matsushima, D. Ikeda, K. Kobayashi and G. Okada, "NO₂ Gas Sensing Properties of Ga-doped ZnO Thin Film", *Sensors and Actuators B*, 13-14, pp. 621-622, 1993.
- [7] 박종현, 김태균, 송호근, 김광호, "스크린 프린팅법을 이용한 NO_x 감지용 WO₃ 후막형 가스센서의 제조 및 특성연구", *요업학회지*, 36(3), pp. 237-243, 1999.
- [8] M. Akiyama, Z. Zhang, J. Tamiki, N. Miura and N. Yamazoe, "Tungsten Oxide-Based Semiconductor Sensor for Detection of Nitrogen Oxides in Combustion Exhaust", *Sensors and Actuators B*, 13-14, pp. 619-620, 1993.
- [9] M. Akiyama, J. Tamiki, N. Miura and N. Yamazoe, "Tungsten Oxide-Based Semiconductor Sensor Highly Sensitivity to NO and NO₂", *J. Chem. Lett.*, pp. 1611-1614, 1991.
- [10] A. Gurlo, N. Barson, M. Ivanovskaya, U. Weimar and W. Gopel, "In₂O₃ and MoO₃-In₂O₃ Thin Film Semiconductor Sensors: Interaction with NO₂ and O₃", *Sensors and Actuators B*, 47, pp. 92-99, 1998.
- [11] A. Gurlo, M. Ivanovskaya, N. Barsan, M. Schweizer Berberich, U. Weimar and W. Gopel, A. Dieguez, "Grain Size control in Nanocrystalline In₂O₃ Semiconductor Gas Sensors", *Sensors and Actuators B*, 44, pp. 327-333, 1997.
- [12] H. Yamaura, T. Jinkawa, J. Tamaki, K. Moriya, N. Miura, and N. Yamazoe, "Indium Oxide-based Gas Sensor for Selective Detection of CO", *Sensors and Actuators B*, 35-36, pp. 325-332, 1996.
- [13] H. Yamaura, J. Tamaki, K. Moriga, N. Miura and N. Yamazoe, "Highly Selective CO Sensor Using Indium Oxide Double Promoted by Co and Gold", *J. Electro. Chem. Soc.* 144, pp. L158-L160, 1997.
- [14] J. Mizsei, "Activating Technology of SnO₂ Layers by Metal Particles from Ultrathin and Metal Films", *Sensors and Actuators B*, 15-16, pp. 328-333, 1993.
- [15] W. K. Choi, S. K. Song, J. S. Cho, Y. S. Yoon, D. Choi, H. J. Jung and S. K. Koh, "H₂ Gas-sensing Characteristics of SnO_x Sensors Fabricated by a Reactive Ion-assisted Deposition with/without an Activator Layer", *Sensors and Actuators B*, 40, pp. 21-27, 1997.
- [16] J. I. Jeong, J. H. Moon, J. H. Hong, J. S. Kang, Y. Fukuda and Y. P. Lee, Characterization of Low-resistivity Indium Oxide Films by Auger Electron Spectroscopy, X-ray Photoelectron Spectroscopy, and X-ray Diffraction and Correlation between their Properties, Composition, and Texture, *J. Vac. Sci. Technol. A*14(2), 293-298, (1996).
- [17] R. W. Hewitt and N. Winograd, "Oxidation of Polycrystalline Indium Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy and Static Secondary Ion Mass Spectroscopy", *J. Appl. Phys.* 51, pp. 2620-2624, 1980.
- [18] A. W. C. Lin, N. R. Armstrong and T. uwana,

- "X-ray Photoelectron/Auger Electron Spectroscopic Studies of Tin and Indium Metal Foils and Oxides", Anal. Chem. 49, pp. 1228-1235, 1977.
- [19] K. S. Kim, "X-ray Photoelectron Spectroscopic Studies of the Electronic Structure of CoO", Phys. Rev. B, 11, pp. 2177-2185, 1975.
- [20] T. L. Barr, "An ESCA Study of the Termination of the Passivation of Elemental Metals", J. Phys. Chem. 82, pp. 1801-1810, 1978.
- [21] T. L. Barr and Y. L. Liu, "An X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of the Valence Band Structure of Indium Oxides", J. Phys. Chem. Solids, 50, pp. 657-664, 1989.
- [22] D. Briggs and V. A. Gibson, Chem. Phys. Lett. 25, pp. 493-496, 1974.
- [23] W. Y. Chung, G. Sakai, K. Shimanoe, N. Miura, D. D. Lee and N. Yamazoe, "Preparation of indium oxide thin film by spin-coating method and its gas-sensing properties", Sensor and Actuators B, 46, pp. 139-145, 1998.
- [24] D. J. Yoo, J. Tamaki, S. J. Park, N. Miura and N. Yamazoe, "Copper Oxide-Loaded Tin Dioxide Thin Film for Detection of Dilute Hydrogen Sulfide", Jpn. J. Appl. Phys. 34, pp. L455-L457, 1995.

著 者 紹 介

이 해 정

1997-1999, 안동대 물리학
 1999-현재, 건국대 물리학과 석사과정
 ZnO, In₂O₃등을 이용한 가스센서, 투명 전극등을 연구

송 재 훈

1996 - 1998 : 건국대 공업화학과 석사
 1998 - 현재 : 한양대 무기재료공학과 박사과정
 CMR 물질인 LCMO을 이용한 저온 thermistor연구,
 gas cluster ion beam을 이용한 surface micromachining 연구

권 순 남

1990-1992 : 연세대 물리학과 석사
 1993-현재 : 연세대 물리학과 박사과정
 유기 EL 물질과 anode물질 사이의 일함수 조절을
 진공자외선 분광학(UPS)으로 연구

김 태 송

1979-1983 : 연세대 세라믹스공학과
 1983-1992 : KAIST 공학박사/KIST 책임연구원
 산화물 박막을 이용한 가스센서, MEMS technology

김 광 주

1977-1981 : 연세대 물리학과
 1982-1984 : 서울대 이학석사,
 1985-1990 : Iowa State University, ph.D
 1994-현재 : 건국대 물리학과 부교수
 Ellipsometer, 방사광을 이용한 반도체의 광학적/전기적 물성 연구

정 형 진

1976 : Leeds Unversity, ph.D
 1977-현재 : KIST 책임연구원,
 1994-1996 : KIST 부원장
 1998-현재 : 공학원회원
 1999-현재 : 센서학회장
 Ferroelectric material, sensor material, 유리
 등에 관한 연구



최 원 국

1980-1984 : 연세대 물리학과

1984-1986 : 연세대 이학석사

1986-1993 : 표면물리 ph.D,

1993-1994 : University of Oregon,
post-doc

1994-1996 : KIST세라믹스부 post-doc

1996-현재 : KIST 박막기술연구센터에서 책임연구원

1998년 Kyushu University의 N.Yamazoe group을 방문 연구. 산화물박막을 이용하여 가스센서, 자외선 검출기, 발광 소자등에 대한 연구를 진행하고 있으며 x-ray photoelectron spectroscopy등을 통하여 산화물과 환원성가스, 촉매 사이의 상호작용에 대한 연구를 주로 하고 있다.