

## 산화아연 나노구조 박막의 일산화탄소 가스 감지 특성

웬래홍 · 김효진<sup>†</sup> · 김도진  
충남대학교 공과대학 재료공학과

### CO Gas Sensing Characteristics of Nanostructured ZnO Thin Films

Nguyen Le Hung, Hyojin Kim<sup>†</sup> and Dojin Kim

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(2010년 4월 19일 접수 : 2010년 5월 7일 최종수정 : 2010년 5월 7일 채택)

**Abstract** We investigated the carbon monoxide (CO) gas-sensing properties of nanostructured Al-doped zinc oxide thin films deposited on self-assembled Au nanodots (ZnO/Au thin films). The Al-doped ZnO thin film was deposited onto the structure by rf sputtering, resulting in a gas-sensing element comprising a ZnO-based active layer with an embedded Pt/Ti electrode covered by the self-assembled Au nanodots. Prior to the growth of the active ZnO layer, the Au nanodots were formed via annealing a thin Au layer with a thickness of 2 nm at a moderate temperature of 500°C. It was found that the ZnO/Au nanostructured thin film gas sensors showed a high maximum sensitivity to CO gas at 250°C and a low CO detection limit of 5 ppm in dry air. Furthermore, the ZnO/Au thin film CO gas sensors exhibited fast response and recovery behaviors. The observed excellent CO gas-sensing properties of the nanostructured ZnO/Au thin films can be ascribed to the Au nanodots, acting as both a nucleation layer for the formation of the ZnO nanostructure and a catalyst in the CO surface reaction. These results suggest that the ZnO thin films deposited on self-assembled Au nanodots are promising for practical high-performance CO gas sensors.

**Key words** ZnO gas sensor, nanostructured ZnO thin film, Au nanodots.

### 1. 서 론

가스 센서(gas sensor)는 주위 가스 환경에 존재되어 있는 특정 가스의 존재 여부와 농도 등의 정보를 파악하는 감지 소자이다. 대개 가스 센서는 가스 환경에 관한 정보를 획득하는 감지체(sensing material)와 그 정보를 처리할 수 있는 신호로 변환하는 트랜스듀서(transducer)라는 신호 전달 체계로 구성된다. 가스 감지체는 검출대상 가스에 선택적으로 민감하게 반응하는 적절한 소재를 선정함으로써 최적화된다.

최근에 들어, 환경과 자동차 관련 응용을 포함하는 독자적인 응용성 덕분에 반도체 금속 산화물(semiconducting metal oxide)를 감지체로 활용하는 가스 센서에 대한 관심이 점점 증가하고 있다.<sup>1)</sup> 여기서 감지체는 일반적으로 반도체 금속 산화물 박막으로 구성된다. 반도체 금속 산화물 가스 센서는, 검출 가스에 노출되었을 때 일어나는 감지체의 표면에서의 검출 가스의 흡착에서 비롯되는 센

서의 전기 저항 변화에 근거하여 작동한다. 이러한 가스 센서는 작은 크기, 저비용, 제작의 용이성 및 실리콘 미세공정과의 적합성과 같은 다양한 장점에도 불구하고 만족스럽지 못한 장기적 안정성, 상대적으로 낮은 작동 온도, 미흡한 가스 선택성 및 낮은 최대 감도와 같은 몇 가지 단점을 여전히 지니고 있다.<sup>2,3)</sup>

감지체로서 유용한 반도체 금속 산화물 중에서 특히, 산화아연(ZnO)은 암모니아(NH<sub>3</sub>), 일산화질소(NO), 수소(H<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 에탄올과 같은 유독 가스 및 폭발성 가스의 검출용으로 널리 연구되어 왔다.<sup>4-13)</sup> 이 논문은 CO 가스의 검출 문제에 집중하는데, 그 까닭은 CO 가스가 가장 위험한 가스들 가운데 하나이고 자동차 연소와 각종 화재에서 탄소 화합물의 불완전 연소가 일어날 때마다 형성되기 때문이다. 지금까지, 일반적인 박막 형태<sup>4,5)</sup>와 나노결정<sup>6,7)</sup> 및 나노선<sup>8,9)</sup>을 포함하여 다양한 형태의 ZnO를 활용하는 ZnO계 CO 가스 센서가 시도되어 왔다.

일반적으로, 감지체 ZnO의 미세구조의 조직과 함께 가스 표면 반응의 촉매가 ZnO계 가스 센서의 가스 감지 특성에 뚜렷한 영향을 미친다고 알려져 있다.<sup>14)</sup> 이 논문에서

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-Mail : hyojkim@cnu.ac.kr (H. Kim)

는 핵생성 층(nucleation layer)으로서 Au 나노점(nanodot) 층을 도입함으로써 증착되는 ZnO 박막의 표면 형상을 변화시키려고 시도한다. 여기서 Au 나노점 층은, 감지체 ZnO 층을 증착하기 전에 얇은 Au 층을 먼저 증착한 후에 적당한 온도에서 열처리를 함으로써 자기조립적으로 형성된다. 우리는 또한 Au 금속이 표면 반응의 촉매로서의 역할을 담당하여 최적의 작동 온도를 낮추고 최대 감도를 높일 것이라고 기대한다. 게다가, 우리는 신뢰성 있는  $n$ -형 반도체 ZnO 층을 확보하기 위해 마그네트론 함께 때려내기(cosputtering) 방법을 사용하여 ZnO 박막에 약 2at%의 Al을 첨가하고자 한다. 이 점에 관해서는, Al을 ZnO에 첨가함으로써 ZnO계 가스 센서의 가스 감도와 선택성이 향상될 수 있다고 보고되었는데,<sup>5,13,15</sup> 특히 Kim and Son<sup>13</sup>은 에탄올 가스에 대한 감도의 향상은 Al 첨가에 의한 ZnO의 저항 감소에서 기인한다고 제시하였다.

이 논문에서는, 자기조립된 Au 나노점으로 구성된 Au 핵생성 층을 도입함으로써 ZnO 박막 가스 센서의 CO 가스 감지 특성이 향상되는 현상을 보고한다. 이러한 ZnO/Au 박막 가스 센서는 상대적으로 높은 최대 감도와 꽤 낮은 CO 가스 농도에서 CO 가스에 대해 높은 감도와 빠른 가역적 반응을 나타낸다는 점을 보여줄 것이다. 그 결과, 자기조립된 Au 나노점 층 위에 증착된 ZnO 박막은 저비용 고성능 CO 가스 센서용 소재로서 유망하다는 점을 예증할 것이다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 두께가 100 nm인 SiO<sub>2</sub> 절연 층이 성장된  $p$ -형 Si (100) 기판 위에 ZnO/Au 박막 가스 센서 구조를 제작하였다. ZnO/Au 가스 센서 구조는 Pt/Ti 전극 층, Au 층 그리고 ZnO 층 순으로 증착하여 형성하였다. 먼저 그림자 가리개(shadow mask)를 사용하여 dc 때려내기 방법으로 병렬 구조의 Pt/Ti 전극 한 쌍을 증착하였다. 그 위에 dc 때려내기 방법을 사용하여 두께가 2 nm인 얇은 Au 층을 증착하였다. ZnO 층을 증착하기 전에, 증착된 Au 층을 질소 분위기에서 30분 동안 500°C에서 열처리를 함으로써 자기조립된 Au 나노점들로 이루어진 Au 층을 얻을 수 있었다. 그 위에 다른 그림자 가리개를 사용하여 rf 함께 때려내기 방법으로 2at%의 Al이 첨가된 ZnO 박막을 증착하였다. 그 결과, 다른 논문<sup>12</sup>에서 그림으로 나타낸 것처럼, 가스 센서의 구조는 자기조립된 Au 나노점들에 파묻힌 Pt/Ti 병렬 전극이 아래에 위치한 ZnO계 활성층(active layer)으로 구성되었다. 비교를 위해, Au 층이 없는 ZnO 박막 가스 센서 구조도 비슷한 방법으로 제작되었다.

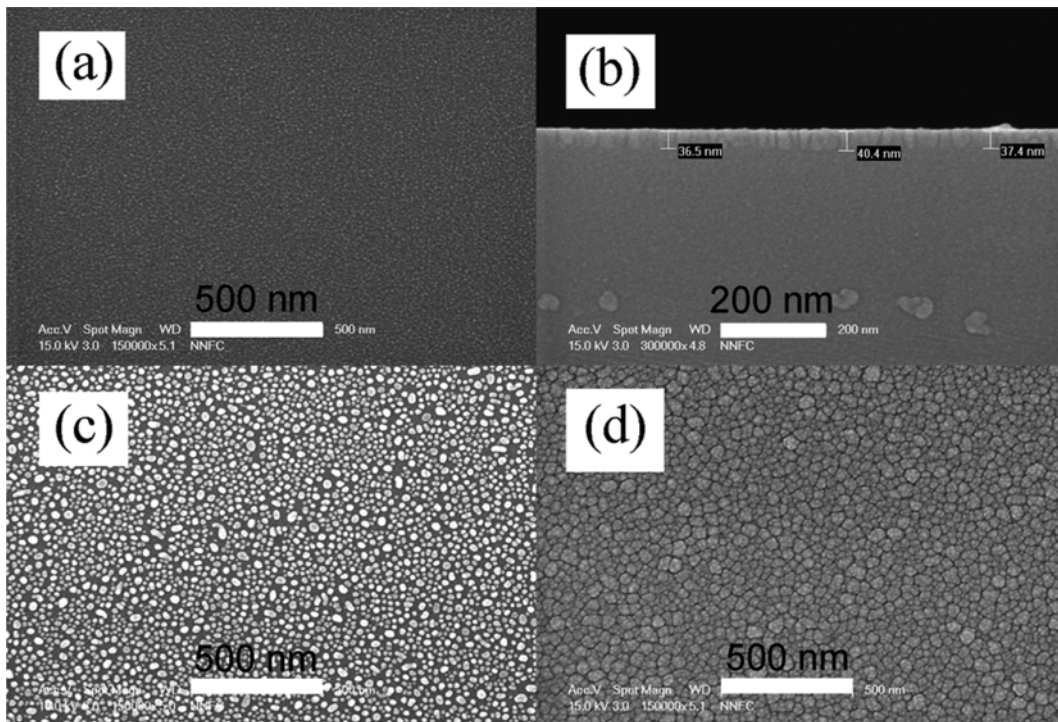
약 2at%의 Al이 첨가된 ZnO 박막은 Ar과 O<sub>2</sub> 가스가 2:1의 비율로 혼합된 5 mTorr의 분위기에서 Zn와 Al 금속 타겟을 사용하여 rf 함께 때려내기 방법으로 증착되었다. 기판 온도는 100°C로 유지하였고, 기판과 타겟 사이의 거리는 12 cm로 고정하였다. 때려내기 전력은 Zn와 Al 타겟에 대하여 각각 100 W와 80 W로 맞추었다. 증착된 박막의 두께는 40 nm 정도였다.

Al이 첨가된 ZnO 활성층의 결정구조는 Cu K<sub>α</sub> 선을 이용한 X-선 회절(XRD)을 통해 육방 우르자이트(wurtzite) 구조임을 확인하였고, 제조된 활성층의 미세구조는 주사전자현미경(SEM)을 통하여 조사하였다. 첨가된 Al의 양은 X-선 형광분광기를 사용한 정량 분석을 통해 대략 2at%로 밝혀졌다. 제작된 ZnO/Au 가스 센서의 CO 가스 감지 특성은 자체 제작한 가스 감지 특성평가 장치를 사용하여 측정하였다. 센서의 저항 반응곡선을 측정하기 위해, 직류 전압은 2 V에 고정하여 시간에 따른 전류 변화를 기록하였다. 센서의 가스 감지 특성을 측정하기 전에, 감지체와 전극 사이에 오믹 접촉(Ohmic contact)이 형성되었음을 먼저 확인하였다. 감지 특성을 측정하는 동안, 건조 공기 속 CO 가스의 농도는 질량식 유량조절기를 사용하여 5 ppm에서 70 ppm까지 변화되었고, 센서의 작동온도는 150°C에서 400°C까지 정확하게 조절되었다.

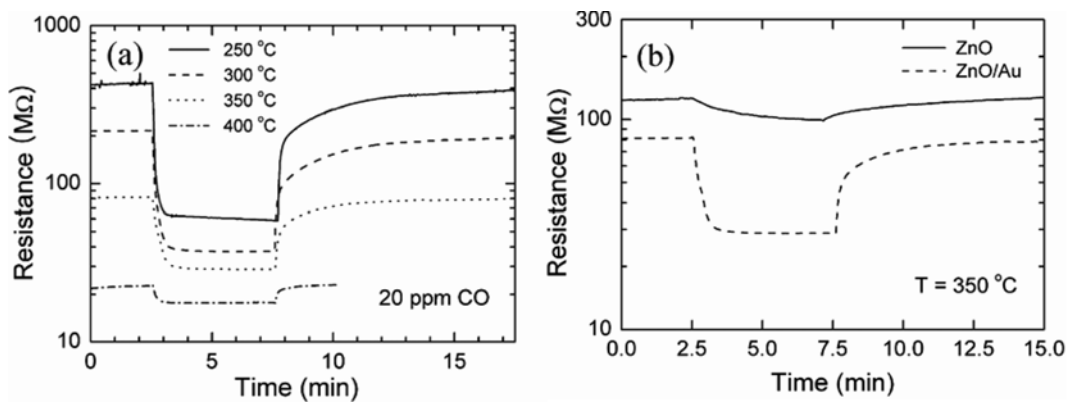
## 3. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)와 1(b)는 Au 층을 증착하지 않은 채 SiO<sub>2</sub>/Si (100) 기판 위에 직접 증착된 2at%의 Al이 첨가된 ZnO 박막(이후에 ZnO로 짧게 나타낸다)의 미세구조를 보여주는데, 여기서 ZnO 박막은 매우 치밀하고 평탄한 표면과 촘촘한 원주모양의 구조를 지님을 알 수 있다. Au 층을 2 nm로 얇게 증착한 후에 질소 분위기에서 30분 동안 500°C에서 열처리를 함으로써 자기조립된 Au 나노점들을 형성할 수 있음을 Fig. 1(c)에서 확인할 수 있다. Fig. 1(d)에서 분명히 볼 수 있는 것처럼, 자기조립된 Au 나노점들 위에 증착된 2at%의 Al이 첨가된 ZnO 박막(이후에 ZnO/Au로 짧게 나타낸다)의 미세구조는, 기판 위에 직접 증착된 ZnO 박막과는 대조적으로, 평균 알갱이 크기(grain size)가 대략 40 nm인 균질한 나노구조를 나타낸다. 이 결과들은 핵생성 층으로서 자기조립된 Au 나노점들이 ZnO 박막의 미세구조에 뚜렷한 영향을 미친다는 점을 예증한다.

나노구조의 ZnO/Au 박막 가스 센서의 CO 가스 감지 특성은 다양한 CO 가스 농도와 작동 온도에 대하여 측정되었다. Fig. 2(a)는 작동 온도 250, 300, 350 및 400°C에서 건조 공기 중 가스 농도가 20 ppm인 CO 가스에 대한 ZnO/Au 나노구조 박막 가스 센서의 저항 반응 곡선



**Fig. 1.** (a), (b) Typical top-view and cross-sectional SEM images of Al-doped ZnO thin films deposited directly onto a SiO<sub>2</sub>/Si (100) substrate. (c) SEM image of self-assembled Au nanodots. (d) Typical SEM image of Al-doped ZnO thin films deposited onto the self-assembled Au nanodots.



**Fig. 2.** (a) Typical resistance response curves of ZnO/Au thin film gas sensors for a CO gas concentration of 20 ppm in dry air at various operating temperatures. (b) Resistance response curves of a ZnO/Au gas sensor (dotted line) and a ZnO gas sensor (solid line) when exposing to 20 ppm CO in dry air at 350 °C.

을 보여준다. 각 온도에서 센서의 초기 저항은 높고 일정한 반면에 CO 가스에 노출되었을 때에는 그것의 저항이 갑자기 감소하는데, 이 현상은 *n*-형 반도체가 CO 가스와 같은 환원성 가스를 감지하는 메커니즘에 의해 설명된다. 또한 작동 온도가 높아짐에 따라 센서의 초기 저항이 낮아지는 현상도 ZnO의 반도체 특성에서 기인한다. Fig. 2(a)에서 ZnO/Au 나노구조 박막 가스 센서의 반응 특성이 작동 온도에 의존한다는 점을 분명히 볼 수 있다. 또한 자기조립된 Au 핵생성 층이 ZnO계 가스

센서의 CO 가스 감지 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해, 작동 온도 350 °C에서 건조 공기 속 가스 농도가 20 ppm인 CO 가스에 노출된 ZnO/Au 가스 센서와 ZnO 가스 센서의 저항 반응 곡선을 Fig. 2(b)에 같이 나타내었다. 여기서 Au 핵생성 층의 도입 덕분에 저항의 상대적인 변화, 즉 가스 감도가 상당히 증가함을 알 수 있는데, 이것은 Fig. 1에서 보여준 것처럼 ZnO 활성층의 미세구조의 뚜렷한 변화에서 주로 기인하는 것으로 여겨진다. 일반적으로 반도체성 금속 산화물 센서의 가스 감지 메

커니즘은 감지체 표면에서의 가스 흡착과 탈착으로 인한 전기 저항 또는 전도도의 변화에 근거하고 있다. 예컨대, ZnO계 가스 센서가 공기에 노출되었을 때, 대기 중의 산소는 ZnO의 노출 표면에 흡착하여 ZnO 전도띠(conduction band)로부터 전도 전자를 포획함으로써 O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sup>-</sup> 또는 O<sup>2-</sup> 이온을 형성하는데,<sup>16)</sup> 각각의 표면 반응은 다음과 같다.



여기서 Al이 첨가된 ZnO가 *n*-형이라는 점을 고려하면, 이런 표면 반응들로 인해 주 나르개(majority carrier), 즉 전자의 수는 감소하고, 따라서 Al이 첨가된 ZnO 박막은 공기 중에서 꽤 높은 저항을 나타내야만 한다. 우리의 ZnO계 센서가 CO gas와 같은 환원성 gas에 노출되었을 때, CO gas는 흡착된 산소 이온들과 반응하여 CO<sub>2</sub> 분자를 생성하면서 전자를 전도띠에 되돌려준다.



이런 반응들은 전도도를 증가시키고, 따라서 Fig. 2에서 관찰한 대로, 우리의 ZnO계 가스 센서의 저항은 감소한다.

CO gas와 같은 환원성 gas의 경우에, *n*-형 반도체 금속 산화물 가스 센서의 감도(sensitivity) S<sub>g</sub>는 일반적으로 건조 공기에서의 전도도 G<sub>a</sub>에 대하여 가스 센서가 건조 공기 속 검출대상 gas에 노출되었을 때의 전도도 변화(ΔG = G<sub>g</sub> - G<sub>a</sub>)의 비로 정의된다.

$$S_g = \Delta G / G_a = (R_a - R_g) / R_g \quad (7)$$

여기서, R<sub>a</sub>와 R<sub>g</sub>는 각각 건조 공기에서의 전기 저항과 검출대상 gas에 노출되었을 때의 전기 저항이다.

Fig. 3(a)는 작동 온도 350°C에서 건조 공기 속 CO 가스 농도에 대한 ZnO/Au 가스 센서의 반응 변화를 보여준다. 센서 저항의 상대적 변화, 즉 센서 감도는 CO 가스 농도가 증가함에 따라 뚜렷한 변화를 나타내며 눈에 띄게 증가함을 분명히 알 수 있다. Fig. 3(b)는 작동 온도 350°C에서 건조 공기 속 가스 농도가 20 ppm인 CO gas에 주기적으로 노출되었을 때, ZnO/Au 가스 센서의 전형적인 저항 반응 곡선을 보여준다. 반응 곡선의 가역적인 순환은 CO 가스 감지가 반복 가능하고 안정하게 작동하고 있음을 명백히 가리킨다. 반응 시간(response time)과 회복 시간(recovery time)은 각각 24초와 169초 정도였다. 여기서, 통상적인 ZnO 박막과 나노결정 ZnO

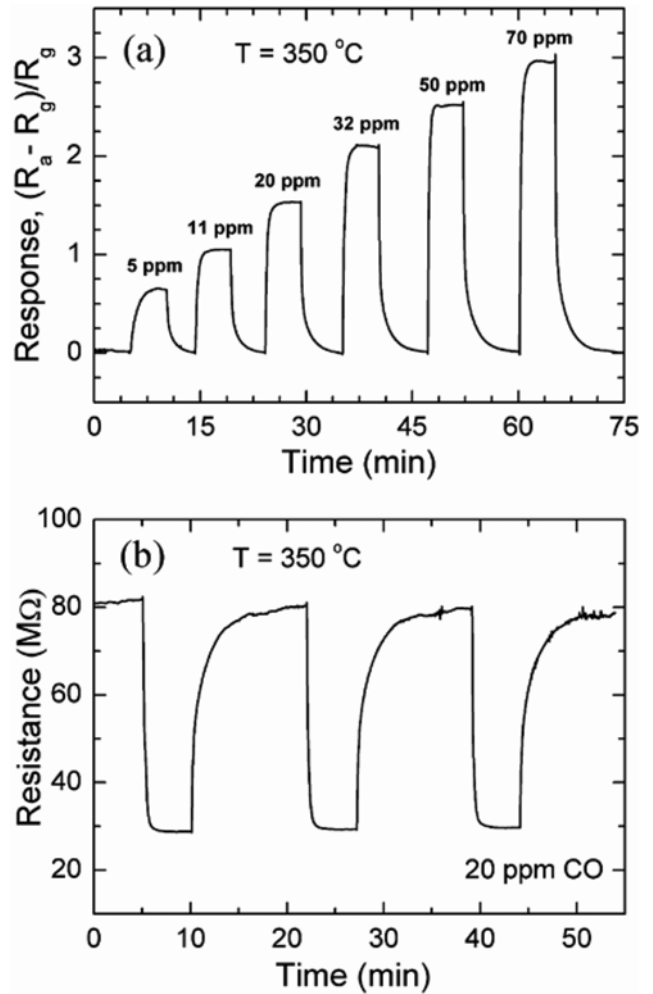
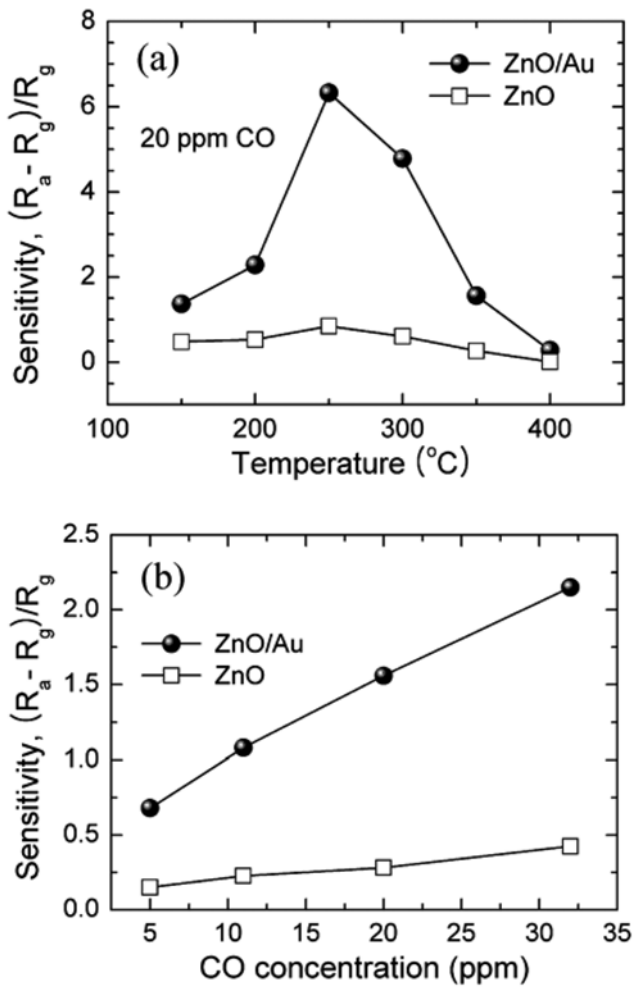


Fig. 3. (a) Variation in the response of the ZnO/Au gas sensor with CO gas concentration in dry air at an operating temperature of 350°C. (b) Resistance response curves of the ZnO/Au sensor during periodical exposure to 20 ppm CO in dry air at 350°C.

박막을 활용하는 다른 형태들의 ZnO계 CO 가스 센서에 대한 연구결과<sup>5,6)</sup>와 비교해 보면, 나노구조 ZnO/Au CO 가스 센서는 훨씬 더 빠른 반응과 회복 거동을 보여준다. Fig. 3(a)에 나타난 반응 곡선들로부터, ZnO/Au 가스 센서의 반응 시간은 CO 가스 농도가 증가함에 따라 감소하는(5 ppm과 70 ppm에 대하여 각각 100초와 17초) 반면에, 회복 시간은 CO 가스 농도가 증가함에 따라 증가한다(5 ppm과 70 ppm에 대하여 각각 130초와 250초)는 점을 알 수 있다. 이런 거동은 CO 가스 농도가 증가함에 따라 산소의 흡착-탈착 반응의 정도가 강화되는 것과 관련지어 이해할 수 있다.

Fig. 4(a)는 건조 공기 중 20 ppm CO gas에 노출되었을 때, 자기조립된 Au 나노점 핵생성 층이 있는 ZnO/Au 가스 센서와 그런 핵생성 층이 없는 ZnO 가스 센서의 가스 감도가 작동 온도에 따라 변화하는 양상을 보여준



**Fig. 4.** (a) Sensitivity versus operating temperature of the ZnO/Au gas sensor (solid circle) and the ZnO gas sensor (open square) when exposing to 20 ppm CO in dry air. (b) Sensitivity as a function of CO gas concentration for the ZnO/Au gas sensor (solid circle) and the ZnO gas sensor (open square) operated at 350°C.

다. 나노구조 ZnO/Au 센서의 감도는 작동 온도 250°C에서 최대값 6.4에 이르는데, 이 값은 같은 작동 온도에서 ZnO 박막 센서의 최대 감도(~0.9)보다 7배 이상 높다. 또한, Table 1에서 정리하여 비교한 대로, ZnO/Au 센서의

최대 감도는 대체적으로 다른 형태의 ZnO계 CO 가스 센서들의 최대 감도보다도 더 크며, 최적의 작동 온도도 비교적 더 낮다. 여기서 ZnO/Au 센서가 노출된 CO 가스의 농도가 다른 형태의 센서들보다 더 낮다는 점을 주목할 필요가 있다. 이런 결과는 나노구조 ZnO/Au 박막 가스 센서는 상대적으로 낮은 온도에서 낮은 농도의 CO 가스에 대해 높은 감도를 나타낼 수 있음을 가리킨다.

일반적으로 최대 감도가 중간의 작동 온도에서 나타나는 거동은 반도체 가스 센서의 전형적인 특징이다. 온도가 높아질수록 가스 감도가 증가하는 현상은 열적 활성화의 증진으로 CO 가스의 흡착반응이 향상되어 전도도의 변화, 즉  $\Delta G$ 가 커진 결과로 나타나는 것으로 이해된다. 한편, 250°C에서 이상에서 감도가 낮아지는 까닭은 온도가 올라감에 따라  $\Delta G$ 보다  $G_a$ 가 더 빠르게 증가하기 때문(Fig. 2)으로 여겨진다(감도  $S_g = \Delta G/G_a$ 로 정의된다). 또한 이것이 고온에서 나노구조 ZnO/Au 센서와 ZnO 박막 센서의 감도 차이가 줄어드는 현상을 설명할 수 있다.

Fig. 4(b)는 작동 온도 350°C에서 CO 가스 농도에 대한 ZnO/Au와 ZnO 박막 센서의 감도 변화를 보여준다. ZnO/Au 센서와 ZnO 센서 둘 다 CO 가스 농도가 증가함에 따라 감도가 증가한다. Fig. 4(b)에서 분명히 볼 수 있듯이, CO 가스의 모든 검출 범위에서 ZnO/Au 센서가 ZnO 센서보다 훨씬 더 높은 감도를 나타낸다.

반도성 금속 산화물 가스 센서의 가스 감지 특성은 감지체 표면에서 일어나는 흡착 산소와 검출대상 가스 사이의 표면 반응의 종류와 세기에 달려 있다. 표면 반응은 열적으로 활성화되는 과정이기 때문에 반응 속도는 표면 반응이 일어나는 감지체의 단위 부피 당 유효 표면의 넓이와 표면 반응의 활성화 에너지의 크기에 의존한다. 따라서 감지체의 미세구조의 기하학적 열개와 촉매 원소가 가스 센서의 특성에 큰 영향을 미친다.<sup>14)</sup> 따라서 자기조립된 Au 나노점 핵생성 층 위에 증착된 ZnO 박막에서 CO 가스 감지 특성이 향상되는 현상은, Au 핵생성 층을 도입함으로써 ZnO 박막의 미세구조를 변화 시킴으로써 실질적인 감지체 ZnO가 통상적인 박막 구

**Table 1.** A comparison of the CO gas sensing properties for several types of ZnO-based gas sensors.

Sensor Type	Maximum Sensitivity	Optimal Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	CO density (ppm)	Ref.
ZnO/Au film	6.4	250	20	This work
ZnO film	1.0	350	30	4
ZnO:Al film	0.62	400	1000	5
NC <sup>a)</sup> ZnO	3.12	370	200	6
NC ZnO:Cu film	2.7	350	20	7
ZnO-Au NW <sup>b)</sup>	0.47	350	50	8
ZnO-Au NW	~10	200	200	9

<sup>a)</sup>nanocrystalline, <sup>b)</sup>nanowire

조일 때보다 훨씬 넓은 유효 표면반응 면적을 가지게 된 결과에서 기인하는 산소 이온-CO 가스 표면 반응의 강화 덕분이라고 이해될 수 있다. 부가적으로, Au 금속의 가능한 촉매 효과도 표면 반응의 강화에 기여하리라 추정된다.<sup>4,18)</sup> 여기서 유효 표면적 효과와 촉매 효과를 정량적으로 분별할 수 있기 위해서는 더 연구할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

때려내기 방법을 사용하여 자기조립된 Au 나노점 핵생성 층 위에 증착한 나노구조 ZnO 박막으로 이루어진 가스 센서(ZnO/Au 가스 센서)에 있어서 CO 가스 감지 특성이 향상되어 뛰어난 CO 가스 감지 특성을 관찰할 수 있었다. 특히, ZnO/Au 가스 센서는 상대적으로 높은 최대 감도와 함께 꽤 낮은 CO 가스 농도에서 CO 가스에 대해 매우 민감하고 가역적인 반응을 나타낸다. 나노구조 ZnO/Au 가스 센서의 훌륭한 CO 감지 특성은 Au 나노점들의 두 가지 역할에서 기인한다고 여겨진다. 첫 번째 주요한 역할은 높은 유효 표면적을 나타내는 ZnO 박막의 미세구조 형성을 위한 핵생성 층으로 수행되고, 부가적으로 Au 금속이 CO 가스 검출 과정에서 촉매로서 작용할 수 있다고 여겨진다. 단순한 합성 공정과 함께 이러한 특성들은 자기조립된 Au 나노점 위에 증착된 ZnO 박막이 낮은 온도와 CO 가스 농도에서 작동 가능한 저비용 고성능 CO 가스 센서의 제작에 유용하게 활용될 수 있음을 시사한다.

#### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 국가지정연구실 사업 및 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(R01-2008-000-20014-0).

#### 참 고 문 헌

1. C. A. Grimes, E. C. Dickey and M. V. Pishko, ed., *Encyclopedia of Sensors*, American Scientific Publishers (2006).
2. M. Aslam, V. A. Chaudhary, I. S. Mulla, S. R. Sainkar, A. B. Mandale, A. A. Belhekar and K. Vijaymohan, *Sens. Actuators A*, **75**, 162 (1999).
3. Y. Min, H. L. Tuller, S. Palzer, J. Wöllenstein and H. Böttner, *Sens. Actuators B*, **93**, 435 (2003).
4. J. Müller and S. Weibenrieder, *Fresenius J. Anal. Chem.*, **349**, 380 (1994).
5. J. F. Chang, H. H. Kuo, I. C. Leu and M. H. Hon, *Sens. Actuators B*, **84**, 258 (2002).
6. M. -H. Lin, S. -J. Tzeng, P. -J. Hsiao and W. L. Tsai, *Nanostructured Mater.*, **10**, 465 (1998).
7. H. Gong, J. Q. Hu, C. H. Ong and F. R. Zhu, *Sens. Actuators B*, **115**, 247 (2006).
8. S. -J. Chang, T. -J. Hsueh, I. -C. Chen and B. -R. Huang, *Nanotechnology*, **19**, 175502 (2008).
9. R. K. Joshi, Q. Hu, F. Alvi, N. Joshi and A. Kumar, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 16199 (2009).
10. Y. Kang, D. Oh, H. Song, J. Jung, H. Jung, Y. Cho and D. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **18**, 253 (2008) (in Korean).
11. S. -M. Park, S. -L. Zhang and J. -S. Huh, *Kor. J. Mater. Res.*, **18**, 367 (2008) (in Korean).
12. S. Y. Park, H. Jung, E. Ahn, L. H. Nguyen, Y. Kang, H. Kim and D. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **18**, 655 (2008) (in Korean).
13. D. Y. Kim and J. Y. Son, *Electrochem. Solid State Lett.*, **12**, J109 (2009).
14. S. Ahlers, G. Müller and Th. Doll, in *Encyclopedia of Sensors*, ed. by C. A. Grimes, E. C. Dickey and M. V. Pishko, American Scientific Publishers (2006).
15. H. Nanto, T. T. Minami and S. Takata, *J. Appl. Phys.*, **60**, 482 (1986).
16. S. C. Naisbitt, K. F. E. Pratt, D. E. Williams and I. P. Parkin, *Sens. Actuators B*, **114**, 969 (2006).
17. R. W. J. Scott, S. M. Yang, G. Chabanis, D. E. Williams and G. A. Ozin, *Adv. Mater.*, **13**, 1468 (2001).
18. W. C. Conner, Jr. and J. L. Falconer, *Chem. Rev.*, **95**, 759 (1995).