탄소나노튜브를 알루미늄이 첨가된 산화아연으로 코팅한 층상 복합체의 일산화질소 가스 감지 특성

안은성 · 정훈철 · 웬래홍 · 오동훈 · 김효진[†] · 김도진
충남대학교 공과대학 재료공학과

NO Gas Sensing Characteristics of Layered Composites of Carbon Nanotubes Coated with Al-Doped ZnO

Eunseong Ahn, Hoonchul Jung, Nguyen Le Hung, Donghoon Oh, Hyojin Kim[†] and Dojin Kim

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

(2009년 10월 19일 접수 : 2009년 11월 16일 최종수정 : 2009년 11월 16일 채택)

Abstract We investigated the NO gas sensing characteristics of ZnO-carbon nanotube (ZnO-CNT) layered composites fabricated by coaxial coating of single-walled CNTs with a thin layer of 1 wt% Al-doped ZnO using rf magnetron sputtering deposition. Morphological studies clearly revealed that the ZnO appeared to form bead-shaped crystalline nanoparticles with an average diameter as small as 30 nm, attaching to the surface of the nanotubes. It was found that the NO gas sensing properties of the ZnO-CNT layered composites were dramatically improved over Al-doped ZnO thin films. It is reasoned from these observations that an increase in the surface-to-volume ratio associated with the numerous ZnO “nanobeads” on the surface of the CNTs results in the enhancement of the NO gas sensing properties. The ZnO-CNT layered composite sensors exhibited a maximum sensitivity of 13.7 to 2 ppm NO gas at a temperature of 200°C and a low NO gas detection limit of 0.2 ppm in dry air.

Key words ZnO gas sensor, ZnO-carbon nanotube composite, sputtering deposition.

1. 서 론

가스 센서(gas sensor)는 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. 최근 수십 년 동안 반도체 금속 산화물(semiconducting metal oxide)을 감지체로 활용하는 가스 센서가 비교적 높은 감도(sensitivity)와 저비용, 제작의 용이성, 실리콘 미세공정과의 적합성과 같은 나쁜의 장점 때문에 많은 주목을 받아왔다.¹⁻⁴⁾ 이러한 반도체 금속 산화물 가스 센서는, 가스에 노출되었을 때 O_2^- , O^- 혹은 O^{2-} 와 같은 흡착 이온과 검출대상 가스 분자 사이의 상호작용에서 비롯되는 금속 산화물 층의 전기 저항 변화 현상을 활용하여 작동한다. 금속 산화물 중에서 특히 산화아연(ZnO)은, 일찍이 1962년에 Seiyama 등⁵⁾이 ZnO 박막에서 가스 감지 효과를 처음으로 발견한 이래로 정

평 있는 감지체로서 일산화질소(NO),⁶⁾ 암모니아(NH_3),⁷⁾ 수소(H_2),⁸⁾ 일산화탄소(CO)⁹⁾와 같은 유독 가스와 폭발성 가스의 검출용으로 널리 연구되고 있다. 그렇지만, 통상적인 ZnO 가스 센서는 대부분 박막형으로 낮은 부피 대 표면의 비(surface-to-volume ratio) 때문에 성능이 상당히 제한받고 있다. 게다가 이러한 박막형 ZnO 가스 센서는 가스 선택성(selectivity)이 미흡하고 작동온도(operating temperature)가 대개 300°C 이상으로 비교적 높다는 문제점도 있다.^{8,10)} 이러한 견지에서, 최근에는 가스 감도를 높이고 작동온도를 낮추는 등 전반적인 가스 감지 특성을 향상시키기 위해 부피 대 표면의 비가 높은 ZnO 나노결정과 나노선, 나노막대 등을 감지체로 활용하는 가스 센서에 대한 연구가 활발히 시도되고 있다.¹¹⁻¹⁵⁾

한편, 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 구조적으로 부피 대 표면의 비가 대단히 크기 때문에 당연히 가스 감지 특성을 향상시키기에 유망하다고 기대되었다. 최근에 CNT 가스 센서는 상온에서 뛰어난 감도를 나타내는 것으로 보고되었지만,^{16,17)} 현재로서는 CNT 자체가 감지체로 활용되기에는 가스 반응이 불안정하고 비가역적이며 제작공정이 복잡한 점 등 해결해야 될 문제점들이 많다. 이러한 맥락에서 CNT의 독특한 구조적 장점을 다

[†]Corresponding author
E-Mail : hyojkim@cnu.ac.kr (H. Kim)

른 재료의 가스 감지 특성을 향상시키는 데 활용하고자 하는 연구들이 시도되었다. 예를 들면, SnO_2 박막 성장 중에 CNT를 첨가함으로써 SnO_2 -CNT 복합체를 형성하거나¹⁸⁾ CNT와 함께 피롤(pyrrole) 단분자를 고분자로 만듦으로써 폴리피롤(polypyrrole)-CNT 복합체를 형성함으로써 가스 감도를 향상시킬 수 있었다.¹⁹⁾ 또한, CNT를 금속 산화물 층으로 코팅함으로써 층상 복합체(layered composite) 구조를 구현할 수 있다는 연구결과²⁰⁾를 바탕으로 제작된 ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 경우에도 가스 감지 특성이 상당히 향상되는 것으로 관찰되었다.^{21,22)}

일반적으로, 감지체 ZnO의 미세구조의 기하학적 열개와 함께 가스 표면 반응의 촉매 역할을 하는 금속 원소의 첨가가 ZnO 가스 센서의 가스 감지 특성에 뚜렷한 영향을 미친다.²³⁾ 예를 들면, 알루미늄(Al)을 ZnO에 첨가하거나 백금(Pt) 층을 ZnO 박막에 코팅함으로써 ZnO 가스 센서의 감도를 높이고 작동온도를 낮출 수 있었다.^{9,24,25)} 이 논문에서는, rf 마그네트론 패러내기 증착법(magnetron sputtering deposition)을 사용하여 단벽 탄소나노튜브를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅함으로써 제작된 ZnO-CNT 층상 복합체의 NO 가스 감지 특성을 보고하고자 한다. CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서는 상대적으로 낮은 작동온도에서, 그리고 꽤 낮은 NO 농도에 대하여 높은 감도와 빠른 가역적 반응을 나타낸다는 점을 보여줄 것이다.

2. 실험 방법

가스 센서 구조는 다음과 같이 제작되었다. 먼저 300 nm 두께의 산화실리콘(SiO_2) 절연 층이 성장된 *p*-형 실리콘(Si) 기판 위에 백금(Pt) 전극의 점착력을 높이기 위해 그림자 가리개(shadow mask)를 이용하여 10 nm 두께의 얇은 티타늄(Ti) 층을 직류 마그네트론 패러내기(dc magnetron sputtering) 방법으로 증착한 후에 90 nm 두께의 Pt 전극 층을 같은 패러내기 방법으로 증착하였다. 병렬 구조의 Pt 전극 한 쌍이 형성된 기판 위에 알루미늄(Al)이 첨가된 산화아연-탄소나노튜브(ZnO -CNT) 층상 복합체를 형성하였다. 여기서 층상 복합체는 rf 마그네트론 패러내기 방법을 사용하여 단벽 CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 층으로 얇게 코팅하여 구현하였다. 그 결과, Fig. 1에서 도식적으로 나타난 것처럼, 가스 센서의 구조는 Pt/Ti 병렬 전극이 파묻힌 ZnO-CNT 복합체 활성층(active layer)으로 구성되었다. 가스 센서의 크기는 가로가 3 mm, 세로가 2.5 mm였다.

단벽 CNT는 아크 방전(arc discharge) 방법을 사용하여 아크 방전 전류가 30 A, 가스 압력이 500 torr인 수소 분위기에서 합성되었다. 탄소의 증발 소스로서 철(Fe)과

니켈(Ni), 몰리브덴(Mo)을 촉매 금속으로 넣은 흑연봉을 양극 전극으로 삼았다. 단벽 CNT 합성에 관한 실험과 정은 Kang 등²⁶⁾에 의해 자세하게 기술되었다. 합성된 단벽 CNT는 통기성 네트워크 구조를 형성하는 것으로 확인되었다.

합성된 CNT를 Al이 첨가된 ZnO 층으로 코팅하기 전에 알코올 처리와 열처리 과정을 거쳐 정제하고 촉매제로 넣었던 금속을 제거하였다. 그 다음에, Al과 Zn 금속 타겟을 사용하여 rf 마그네트론 패러내기 방법으로 CNT 네트워크 구조가 형성된 기판에 Al을 첨가한 ZnO 층을 증착하였다. 진공 용기의 증착 전 기본 압력은 3.0×10^{-6} torr였고, 증착 압력은 아르곤(Ar)과 산소(O_2) 가스가 혼합된 분위기에서 5 mtorr로 고정하였다. 증착 온도는 열이 CNT에 끼치는 손상을 막기 위해 200°C로 낮추어 유지하였고, 두 타겟의 rf 전력은 80 W로 고정하였다. 기판과 타겟 사이의 거리는 12 cm였다. 한편, ZnO-CNT 층상 복합체의 NO 가스 감지 특성을 제대로 밝히기 위해 앞에서 서술한 마그네트론 패러내기 증착 조건에서 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 박막을 제조하여 그 특성을 비교하였다.

제작된 가스 센서에서 감지체의 상과 결정구조는 다목적 X-선 회절기의 스침 입사 X-선 회절(glancing-incidence X-ray diffraction, GIXRD)에 의해 분석되었다. GIXRD는 표면에 민감한 기법으로 표면과 박막의 결정구조를 조사하는 데 유용하며, 일반적인 분말 측정법인 θ -2 θ 방법이 아니라 입사각 ω 를 일정하게 유지한 상태(이 경우에는 $\omega=2^\circ$)에서 검출기만 움직여 2 θ 스캔을 하여 회절 데이터를 기록한다.²⁷⁾ 감지체의 미세구조는 주사전자현미경(SEM)을 통하여 조사하였다. 첨가된 Al의 양은 X-선 형광분광기를 사용한 정량 분석을 통해 대략 1 wt%로 밝혀졌다. 제작된 가스 센서의 일산화질소 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 기록

Fig. 1. Schematic diagram of the gas sensing element based on the layered ZnO-CNT composites.

Fig. 2. Room temperature I - V characteristic for the 1 wt% Al-doped ZnO-CNT layered composite.

하였다. 센서의 가스 감지 특성을 측정하기 전에, Fig. 2에 나타낸 것처럼 선형의 I - V 특성을 관찰함으로써 감지체와 전극 사이에 옴릭 접촉(Ohmic contact)이 형성되었음을 먼저 확인하였다. 감지 특성을 측정하는 동안, 건조 공기 속 일산화질소 가스의 농도는 총 흐름속도를 500 sccm으로 유지하는 상태에서 질량식 유량조절기를 사용하여 0.2 ppm에서 10 ppm까지 변화되었고, 센서의 작동온도는 100°C에서 250°C까지 정확하게 조절되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3(a)는 CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 층으로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체에 대하여 입사각 $\omega=2^\circ$ 에서 얻은 GIXRD 결과를 보여준다. Si (311) 회절 피크를 제외한 나머지 관찰된 회절 피크들은 육방 우르자이트(wurtzite) 결정구조의 ZnO 상에서 비롯된 것으로 분석되었다. 이러한 회절 피크들을 살펴보면, 때려내기 방법에 의해서는 ZnO가 CNT 위에서 어떤 특정한 면 방향으로 우선 성장하는 것이 아니라 모든 방향으로, 즉 다결정 구조로 성장한다는 사실을 알 수 있다. 한편, Fig. 3(b)는 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 박막의 표면 미세구조를 보여주는데, 매우 치밀하고 평탄한 표면을 형성함을 알 수 있다. 반면 SEM 사진을 통해 ZnO 박막이 촘촘한 원주모양의 구조로 성장하였음을 확인하였다. Fig. 3(c)와 3(d)는 각각 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 층이 증착되기 이전과 이후의 CNT 미세구조를 보여주는데, 둘 다 통기성 네트워크 구조를 형성함을 분명히 알 수 있다. Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이, 정제 이전의 CNT 구조는 주로 단벽 CNT로 이루어져 있고 촉매금속들이 일부 CNT에 붙어있다. 특히 Fig. 3(a)와 3(d)의 결과는 때려내기 방법을 사용하여 200°C에서 CNT 표면을 염주 모양의 결정성 ZnO 나노입자들로 균질하게 코팅할 수 있음을 분명히 보여준다. 여기서 ZnO 나노입자의 크기는

Fig. 3. (a) GIXRD pattern recorded at incident angle $\omega=2^\circ$ for the 1 wt% Al-doped ZnO-CNT layered composite. (b) Typical SEM image of the 1 wt% Al-doped ZnO thin film. SEM images of the CNTs (c) before coating and (d) after coating with 1 wt% Al-doped ZnO layer.

Fig. 4. (a) Sensitivity versus operating temperature of the 1 wt% Al-doped ZnO-CNT composite sensor (solid square) and 1 wt% Al-doped ZnO film sensor (open circle) when exposing to 2 ppm NO in dry air. (b) Typical response curves of the ZnO-CNT composite sensor to 2 ppm NO in dry air at 250°C. (c) Response curves of the ZnO:Co-CNT composite sensor to various NO concentrations at 200°C. (d) Sensitivity (S) versus NO concentration (P_g) of the ZnO-CNT composite sensor (solid square) and ZnO film sensor (open circle) operated at 200°C. The solid lines are the fit curves of the empirical model, $S \propto P_g^\beta$.

대략 30 nm로 상당히 작다.

CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서와 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 박막 센서의 NO 가스 감지 특성을 다양한 NO 가스 농도와 작동온도에 대하여 측정하였다. 가스 감도(Sensitivity) S 가 감지체의 미세구조의 조직에 의존한다는 사실을 감안하면,²³⁾ 활성 표면적이 큰 구조를 지닌 ZnO-CNT 층상 복합체 센서가 높은 가스 감도를 나타내리라 기대된다. 여기서, 가스 감도 S 는 건조 공기에서의 본래 저항 R_a 에 대하여 센서가 건조 공기 속 검출대상 가스에 노출되었을 때의 저항 변화($R_g - R_a$)의 비로 정의되고: $S = |R_g - R_a|/R_a$, 검출대상 가스와 감지체 사이의 흡착반응 메커니즘에 따라 센서의 저항이 증가하기도 감소하기도 하는 점을 고려하여 가스 감도 S 는 저항 변화의 절대값을 취해 산정된다. 한편, NO 가스는 산화성 가스로서, 예를 들면 다음과 같은 흡착 반응을 통해 센서의 감지체로부터 전자를 포획한다:

여기서 O_{ad}^- 와 $\text{O}_{\text{ad}}^{2-}$ 는 감지체 표면에 흡착되는 산소 이온을 나타낸다. 따라서 공기 중 NO 가스에 노출되었을 때, n -형 반도체 감지체 센서는 저항이 증가하고 p -

형 반도체 감지체 센서는 저항이 감소하게 된다. ZnO-CNT 층상 복합체 센서와 ZnO 박막 센서의 경우 실질적으로 n -형 반도체 ZnO 층이 감지체로서 작동하고, 그 결과 두 종류의 센서 모두 NO 가스에 노출되었을 때 저항이 증가하는 것으로 관찰되었다.

Fig. 4(a)는 건조 공기 중 가스 농도가 2 ppm인 NO 가스에 노출되었을 때, CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서와 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 박막 센서의 가스 감도가 작동온도에 따라 변화하는 양상을 보여준다. ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 감도는 작동온도 200°C에서 최대값 13.7에 이르는데, 이 값은 같은 작동온도에서 ZnO 박막의 최대 감도 ~4보다 3배 이상 높다. Fig. 4(a)에서 명확히 볼 수 있듯이, CNT를 Al이 첨가된 ZnO로 코팅하여 ZnO-CNT 복합체를 형성함으로써 최대 감도를 나타내는 최적 작동온도는 변함없이 200°C이지만 NO 가스에 대한 감도는 전반적으로 눈에 띄게 향상된다. 또한 CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 최대 감도는 350°C에서 작동하는 무첨가 ZnO 박막의 감도보다 여러 배 높다.⁶⁾ 이러한 결과들은 ZnO-CNT 층상 복합체 가스 센서는 보다 낮은 온도에서 NO 가스에 대해 높은 감도를 나타낸다는 사실을 가리킨다.

Fig. 5. Response time versus operating temperature of the 1 wt% Al-doped ZnO-CNT composite sensor (solid square) and 1 wt% Al-doped ZnO film sensor (open circle) when exposing to 2 ppm NO in dry air.

Fig. 4(b)는 250°C에서 건조 공기 속 가스 농도가 2 ppm인 NO 가스에 노출되었을 때, CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 전형적인 저항 반응 곡선을 보여준다. 앞에서 논의한 대로, ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 저항은 NO 가스가 존재할 때 증가한다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있는 반응 곡선의 가역적인 순환은 반복 가능한 안정한 가스 감지 작동을 가리킨다. 반응시간(response time)과 회복시간(recovery time)은 각각 80초와 400초 정도였다.

한편, Fig. 4(c)는 작동 온도 200°C에서 건조 공기 속 네 가지 가스 농도 0.2, 0.5, 2 및 5 ppm의 NO 가스에 대한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 반응곡선을 보여준다. 여기서 이 센서의 반응 특성이 NO 가스 농도에 민감하게 의존함을 분명히 알 수 있다. 작동 온도 200°C에서 ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 NO 가스 검출 한계가 0.2 ppm 이하 즉, ppm 수준 이하(sub-ppm)라는 점은 주목할 만하다.⁶⁾ 그렇지만, 반응시간과 회복시간이 더 높은 작동 온도에서보다 더 길어진다.

작동 온도 200°C에서 CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서와 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 박막 센서의 가스 감도가 NO 가스 농도에 따라 변화하는 양상을 Fig. 4(d)에 나타내었다. 측정 범위의 모든 NO 농도에 대해 ZnO-CNT 층상 복합체에서 감도가 향상된다는 사실이 Fig. 4(d)에서 분명히 확인된다. 두 센서 모두에 대해 NO 농도가 증가함에 따라 감도가 증가한다. 사실상, 반도체 금속 산화물 가스 센서의 감도는 포화 농도보다 낮은 영역에서 경험적으로 다음과 같은 식으로 표현된다: $S = AP_g^\beta$. 여기서 P_g 는 검출대상 부분압으로 가스 농도에 비례하고, 감도는 계수 A 와 지수 β 에 의해 규정된다.²⁸⁾ 특히 지수 β 는 흡착 산

소 이온과 지배적인 표면 반응의 종류에 의거하여 이상적으로는 1 혹은 0.5의 값을 나타낸다. Fig. 4(d)에서 나타난 맞춤 곡선(fit curve)이 보여주는 것처럼, NO 가스 농도에 대한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서와 ZnO 박막 센서의 감도 변화는 둘 다 β 의 값이 0.5에 가까운 비선형 관계를 가진다. 이러한 결과는, CNT를 Al이 첨가된 ZnO로 코팅하여 ZnO-CNT 복합체를 형성함으로써 ZnO와 NO 가스 사이의 지배적인 표면 반응의 종류는 변화시키지 않은 채 유효 표면반응 면적을 넓혀 가스 감도를 향상시킨다는 점을 시사한다. 또한 측정 범위의 모든 NO 농도에서 관찰된 비선형 관계($\beta \sim 0.5$)는 흡착된 표면 산소 이온이 주로 O^{2-} 임을 가리킨다.²⁹⁾ 한편, 계수 A 는 유효 표면반응 면적을 비롯하여 표면반응에 미치는 물리화학적 변화(결정성과 여타 표면 특성을 포함할 것이다)를 반영하는데, 그 값이 ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 경우에 1.08로서 ZnO 박막 센서의 경우의 값 0.48보다 두 배 이상 크다.

가스 센서의 중요한 특성 중에는 반응시간이 있다. 일반적으로 반응시간은 가스 센서가 검출대상 가스에 노출되었을 때 센서가 포화저항의 90%에 도달하는 데 걸리는 시간으로 정의된다.³⁰⁾ Fig. 5는 건조 공기 속 가스 농도가 2 ppm인 NO 가스에 노출되었을 때, CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서와 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 박막 센서의 반응시간이 작동 온도에 따라 변화하는 양상을 보여준다. 두 센서 모두에 대하여 작동 온도가 증가함에 따라 반응시간이 감소함을 분명히 알 수 있다. 이러한 관찰 결과는 온도가 올라감에 따라 열적 활성화(thermal activation)의 증진으로 인하여 NO 가스의 표면 흡착반응이 운동학적으로 더 빨리 일어나기 때문이라고 설명된다. 한편, 측정 온도 범위에서 ZnO-CNT 층상 복합체 센서의 반응시간은 ZnO 박막 센서의 반응시간과 그리 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 보인다. 이러한 결과는 CNT를 Al이 첨가된 ZnO로 코팅함으로써 ZnO와 NO 가스 사이의 표면 반응 활성화 에너지 장벽이 변화되는 것은 아니라는 점을 시사한다. 이 경우에, 표면반응 활성화 에너지 장벽은 촉매 역할을 하는 Al에 의해 낮춰질 것이다.²⁴⁾

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.²³⁾ 여기서, CNT를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO로 코팅한 ZnO-CNT 층상 복합체 센서가 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 박막 센서보

다 반응시간은 짧지 않으면서 훨씬 높은 감도(3배 이상)를 나타낸다는 사실은 실질적인 감지체 ZnO가 부피 대 표면의 비가 매우 큰 CNT를 감싸면서 통상적인 박막 구조일 때보다 훨씬 넓은 유효 표면반응 면적(2배 이상)을 가지게 된 덕분이고, 그리고 첨가 원소 Al은 NO 가스의 표면 반응에 대해 촉매 역할을 하는 것으로 여겨진다. 그 결과, Al이 첨가된 ZnO-CNT 층상 복합체 가스 센서의 NO 감지 특성이 현저하게 향상된다. 물론 가스의 감지 특성은 표면반응 면적과 촉매 원소 외에 결정성과 여타 표면 특성에 의존하기도 하는데, 이런 효과에 대해서는 더 연구할 필요가 있다.

4. 결 론

마그네트론 패러내기 증착법을 사용하여 단벽 탄소나노튜브를 1 wt%의 Al이 첨가된 ZnO 층으로 얇게 코팅함으로써 제작된 ZnO-CNT 층상 복합체 가스 센서의 NO 가스 감지 특성을 조사하였다. ZnO 박막 센서에 비하여 ZnO-CNT 층상 복합체 센서는 NO 가스 감도가 현저하게 향상되었다. 특히, Al이 첨가된 ZnO-CNT 층상 복합체 NO 가스 센서는 상대적으로 낮은 온도에서 그리고 꽤 낮은 NO 농도에서 민감하고 빠른 반응 특성을 나타내었다. Al이 첨가된 ZnO-CNT 층상 복합체 가스 센서의 뛰어난 NO 가스 감지 특성은 넓은 유효 표면반응 면적의 감지체 구조와 Al의 촉매 역할에서 기인한다고 여겨진다. 따라서, 단순한 합성 공정과 함께 이러한 특성들은 Al이 첨가된 ZnO-CNT 층상 복합체 센서가 보다 낮은 온도에서 작동 가능한 저비용 고성능 NO 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. J. X. Wang, X. W. Sun, Y. Yang, H. Huang, Y. C. Lee, O. K. Tan and L. Vayssieres, *Nanotechnology*, **17**, 4995 (2006).
2. A. S. Zuruqi, A. Kolmalov, N. C. Macdonald and M. Moskovits, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 102904 (2006).
3. H. Huang, O. K. Tan, Y. C. Lee, T. D. Tran, M. S. Tse and X. Yao, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 163123 (2005).
4. Y. S. Kim, S.-C. Ha, K. Kim, H. Yang, S.-Y. Choi, Y. T. Kim, J. T. Park, C. H. Lee, J. Choi, J. Park and K. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 213105 (2005).
5. T. Seiyama, A. Kato and M. Nagatani, *Anal. Chem.*, **34**, 1502 (1962).
6. N. Koshizaki and T. Oyama, *Sens. Actuators B*, **66**, 119 (2000).
7. M. S. Wagh, G. H. Jain, D. R. Patil, S. A. Patil and L. A. Patil, *Sens. Actuators B*, **115**, 128 (2006).
8. S. Basu and A. Dutta, *Sens. Actuators B*, **22**, 83 (1994).
9. J. F. Chang, H. H. Kuo, I. C. Leu and M. H. Hon, *Sens. Actuators B*, **84**, 258 (2002).
10. Y. Min, H. L. Tuller, S. Palzer, J. Wollenstein and H. Bottner, *Sens. Actuators B*, **93**, 435 (2003).
11. J. Xu, Q. Pan, Y. Shun and Z. Tian, *Sens. Actuators B*, **66**, 277 (2000).
12. T. Gao and T. H. Wang, *Appl. Phys. A*, **80**, 1451 (2005).
13. Z. Fan and J. G. Lu, *J. Nanosci. Nanotech.*, **5**, 1561 (2005).
14. A. O. Dikovska, *Sens. Actuators A*, **140**, 19 (2007).
15. S. -M. Park, S. -L. Zhang and J. H. Huh, *Kor. J. Mater. Res.*, **18**, 367 (2008) (in Korean).
16. J. Kong, N. R. Franklin, C. Zhou, M. C. Chapline, S. Peng, J. Cho and H. Dai, *Science*, **287**, 622 (2000).
17. P. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami and A. Zettl, *Science*, **287**, 1801 (2000).
18. A. Wisitsoraat, A. Tuantranont, C. Thanachyanont and P. Singjai, in *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (Zhuhai, China, January 2006)*, p. 1487.
19. K. H. An, S. Y. Jeong, H. R. Hwang and Y. H. Lee, *Adv. Mater.*, **16**, 1005 (2004).
20. T. Ikuno, T. Yasuda, S. Honda, K. Oura, M. Katayama, J.-G. Lee and H. Mori, *J. Appl. Phys.*, **98**, 114305 (2005).
21. J. Jung, H. Song, Y. Kang, D. Oh, H. Jung, Y. Cho and D. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **18**, 529 (2008) (in Korean).
22. 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).
23. 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).
24. H. Nanto, T. T. Minami and S. Tanaka, *J. Appl. Phys.*, **60**, 482 (1986).
25. L. C. Tien, P. W. Sadik, D. P. Norton, L. F. Voss, S. J. Pearton, H. T. Wang, B. S. Kang, F. Ren, J. Jun and J. Lin, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 222106 (2005).
26. Y. Kang, D. Oh, H. Song, J. Jung, H. Jung, Y. Cho and D. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **18**, 253 (2008) (in Korean).
27. M. Birkholz, *Thin Film Analysis by X-ray Scattering*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2006.
28. R. W. J. Scott, S. M. Yang, G. Chabanis, D. E. Williams and G. A. Ozin, *Adv. Mater.*, **13**, 1468 (2001).
29. S. C. Naisbitt, K. F. E. Pratt, D. E. Williams and I. P. Parkin, *Sens. Actuators B*, **114**, 969 (2006).
30. D. R. Patil and L. A. Patil, *Sens. Actuators B*, **123**, 546 (2007).