전기방사법에 의해 합성된 무방향성 산화아연 나노섬유의 일산화질소 가스 감지 특성

김옥길 · 김효진[†] · 김도진
충남대학교 공과대학 재료공학과

Electrospun Non-Directional Zinc Oxide Nanofibers as Nitrogen Monoxide Gas Sensor

Ok-Kil Kim, Hyojin Kim[†] and Dojin Kim

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

(2012년 10월 7일 접수 : 2012년 10월 22일 최종수정 : 2012년 10월 24일 채택)

Abstract We report on the NO gas sensing properties of non-directional ZnO nanofibers synthesized using a typical electrospinning technique. These non-directional ZnO nanofibers were electrospun on an SiO₂/Si substrate from a solution containing poly vinyl alcohol (PVA) and zinc nitrate hexahydrate dissolved in distilled water. Calcination processing of the ZnO/PVA composite nanofibers resulted in a random network of polycrystalline ZnO nanofibers of 50 nm to 100 nm in diameter. The diameter of the nanofibers was found to depend primarily on the solution viscosity; a proper viscosity was maintained by adding PVA to fabricate uniform ZnO nanofibers. Microstructural measurements using scanning electron microscopy revealed that our synthesized ZnO nanofibers after calcination had coarser surface morphology than those before calcination, indicating that the calcination processing was sufficient to remove organic contents. From the gas sensing response measurements for various NO gas concentrations in dry air at several working temperatures, it was found that gas sensors based on electrospun ZnO nanofibers showed quite good responses, exhibiting a maximum sensitivity to NO gas in dry air at an operating temperature of 200°C. In particular, the non-directional electrospun ZnO nanofiber gas sensors were found to have a good NO gas detection limit of sub-ppm levels in dry air. These results illustrate that non-directional electrospun ZnO nanofibers are promising for use in low-cost, high-performance practical NO gas sensors.

Key words oxide gas sensor, zinc oxide, NO gas, electrospinning.

1. 서 론

최근 가속화 되는 산업화, 공업화로 인해 환경의 급격한 변화가 발생되면서 많은 국가들이 환경 문제에 보다 관심이 높아지고 있다. 하지만 우리는 산업현장과 공업 현장에서 불가피하게 인체에 유해한 많은 가스들을 사용하게 된다. 인체에 직간접적으로 해를 끼치는 수많은 가스들은 인간의 감각 기관만으로는 모두 감지해 낼 수 없다. 특히, 폭발 위험성이 있고 유독한 성질을 지닌 가스들은 아주 적은 농도로도 인체에 큰 피해를 끼칠 수가 있으므로, 이런 가스들을 감지해 내려는 노력들은 현재까지도 계속되고 있다. 인체의 감각 기관을 대신하여 감지하며 사람에게 위험을 알려주는 센서(sensor)는 다양

한 목적과 형태를 가지고 개발되고 있다.^{1,2)} 가스센서(gas sensor)는 주위 가스 환경으로부터 특정 가스의 존재 여부와 농도 등의 정보를 감지 소자들의 총칭하는데, 통상적으로 가스 환경의 변화를 포착하는 감지체(sensing material)와 그 정보를 처리할 수 있는 신호로 변환하는 트랜스듀서(transducer)라는 신호 전달 체계로 구성된다. 감지체는 검출하고자 하는 외부 환경의 대상 정보에 적절한 소재를 선정함으로써 최적화된다. 최근 수 십 년 동안 반도체 금속 산화물(semiconducting metal oxide)을 감지체로 활용하는 가스센서가 비교적 높은 감도(sensitivity)와 저비용, 제작의 용이성, 실리콘 미세공정과의 적합성과 같은 나뭇의 장점 때문에 많은 주목을 받아왔다. 특히, 금속 산화물 중 산화아연(ZnO)은 일찍이 1962년에 Seiyama 등³⁾이 ZnO 박막에서 가스 감지 효과를 처음으로 발견한 이래로 일산화질소(NO), 암모니아(NH₃), 수소(H₂), 일산화탄소(CO)와 같은 유독 가스와 폭발성 가스의 검출

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

용으로 널리 연구되고 있다.^{4,7)} ZnO계 가스센서는 이런 가스에 민감하고 안정된 반응을 나타내지만, 가스 감도가 낮고, 가스 선택성(selectivity)이 미흡하며, 작동온도(operating temperature)가 대개 300°C이상으로 비교적 높다는 문제점이 있다.^{6,8)}

최근에는 가스 감도를 높이고 작동온도를 낮추는 등 전 반적인 가스 감지 특성을 향상시키기 위해 ZnO 나노결정과 나노선, 나노막대, 나노섬유 등을 감지체로 활용하는 가스센서에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.⁹⁻¹³⁾ 이와 같은 1차원 나노구조체를 합성하기 위한 방법으로 다양한 방법들이 제시되고 있는데, 전기방사 법(electro-spinning technique)이 1차원 나노구조 소재를 효율적이면서도, 저렴한 비용으로 구현할 수 있는 매우 실용적인 기술로 인식되어 오고 있다.¹⁴⁾ 전기방사법은 이미 1745년부터 Bose에 의해 유동체(fluids)에 고전압을 부여하여 발생되는 에어로졸(aerosols)을 보고하면서 발전되어 왔지만, 1990년경에 이르러 Reneker 연구팀의 활발한 연구¹⁵⁾로 인해 비로소 학계의 주목을 받게 된다. 전기방사법은 용매에 용융 및 혼합이 가능한 모든 고분자 재료에 적용될 수 있고, 전기방사법으로 제작된 나노섬유들은 직경 대비 길이의 연속성이 아주 좋은 일차원 유사구조를 가진다는 장점을 지닌다.¹⁶⁾

본 논문에서는 전기방사법을 통하여 합성한 무방향성 나노섬유 구조의 ZnO를 감지체로 사용하는 가스센서의 일산화질소 가스에 대한 감지 특성을 조사하였다. 여기서 일산화질소 가스를 검출 대상 가스로 선택한 까닭은 일산화질소 가스가 담배 연기와 자동차 엔진, 발전 시설 등에 의해 배출되는, 일상적으로 접하는 공기 오염 가스이기 때문이다. 결과적으로 우리는 ZnO의 무방향성 나노섬유 구조를 가지는 감지체가 낮은 비용, 높은 성능의 일산화질소 가스센서용 소재로써 유망하다는 점을 예증할 것이다.

2. 실험 방법

가스센서의 기본 구조 형성을 위해 두께가 100 nm인 SiO₂ 절연층이 성장된 p-형 Si(100) 기판 위에 가스센서를 제작하였다. 먼저 그림자 가리개(shadow mask)를 사용하여 패터닝 방법(photolithography)으로 병렬 구조의 백금(Pt) 전극 한 쌍을 증착하였다. 전기방사법을 실행하기 위해 용액을 준비하는데, 먼저 증류수에 폴리 비닐 알코올(poly vinyl alcohol, PVA)을 10 wt%로 섞어 하루 동안 90°C에서 휘저어 주었다. 그리고 이 용액과 아연 아세테이트(zinc acetate)를 0.4 mol/L의 비율로 섞어 다시 90°C에서 3시간 동안 휘저어 주었다. 이와 같이 만들어진 용액을 실린저에 주입한 후 전기방사를 시켜 무방향성 나노섬유

를 만들게 된다. 이때 기판의 측면까지 무방향성 나노섬유가 방사되면 전류의 손실이 발생할 수 있기 때문에 폴리이미드 테이프(polyimide tape)를 이용해 가리개 역할을 하였다. 그리하여 다른 논문에서 그림으로 나타낸 것처럼,¹⁷⁾ 가스센서의 구조는 Pt 병렬 전극이 파묻힌 무방향성 ZnO 나노섬유 구조로 이루어진 활성층(active layer)을 구성하였다. 여기서 주목해야 할 점은, ZnO와 Pt 전극 사이의 접착력을 증대시키기 위해 압착기를 이용해 이미 만들어진 나노섬유 전체를 상온에서 10 kgf/cm², 3분간 압착하는 공정을 거친다는 것이다. 이렇게 압착된 나노섬유층 위로 비표면적을 늘리기 위해 1차 공정과 같은 조건으로 다시 전기방사를 하는 이중 공정(double process)을 진행하였다. 마지막으로 합성된 무방향성 ZnO 나노섬유에서 일부 남아있는 PVA와 증류수를 제거하기 위해 우리는 건조공기 분위기에서 700°C, 1시간동안 열처리를 진행하였다.

열처리 과정이 고분자 용액에 미치는 영향을 조사하기 위해 열중량측정-시차열분석기(TG/DTA)를 이용하였다. 만들어진 ZnO 나노섬유들의 미세구조는 냉전계형 장방출 주사전자현미경을 통하여 관찰되었으며, 성분 조사와 결정화 정도를 알아보기 위해 X선 회절 분석기를 사용하였다. 제작된 가스센서의 일산화질소 가스 감지 특성은 자체 제작한 가스 감지 특성평가 장치를 사용하여 측정하였다. 센서의 저항 반응곡선을 측정하기 위해, 직류 전압은 2V에 고정하여 시간에 따른 전류 변화를 기록하였다. 센서의 저항 반응 곡선을 측정하기 위해, 직류 전압은 2V에 고정하여 시간에 따른 전류 변화를 기록하였다. 센서의 가스 감지 특성을 측정하기 전에, Fig. 1에 나타난 것처럼 선형의 I-V 특성을 관찰함으로써 감지체와 전극 사이에 옴릭 접촉(Ohmic contact)이 형성되었음을 먼저 확인하였다. 감지 특성을 측정하는 동안, 건

Fig. 1. Room temperature *I-V* characteristic curve for the ZnO nanofibers annealed in dry air at 700°C.

조 공기 속 일산화질소 가스의 농도는 총 흐름속도를 500 sccm으로 유지하는 상태에서 질량식 유량조절기를 사용하여 2ppm에서 12ppm까지 변화되었고, 센서의 작동 온도는 150°C에서 300°C까지 정확하게 조절되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 증류수와 PVA를 10 wt%의 비율로 혼합한 용액을, Fig. 2(b)는 2(a)의 용액에 아연 아세테이트가 0.4 mole/L의 비율로 용해된 용액을 각각 TG/DTA법으로부터 얻어진 그래프이다. 증류수와 PVA를 혼합한 용액은 약 550°C 이상에서 모두 소멸되지만, 아연 아세테이트 용액에서는 550°C 이상에서도 약 0.38 mg이 남아있는 것을 확인할 수 있다. 이는 아연 아세테이트를 혼합함으로써 열처리 공정 중 증류수와 PVA는 사라지고 ZnO가 형성됨을 미루어 짐작할 수 있다.

여기서 ZnO의 형성 여부는 X-선 회절 분석을 통해 좀 더 명확히 알 수 있는데, 열처리 공정을 거친 전기방사된 나노섬유 구조에 대해 얻어진 X선 회절 패턴을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 표시한 것처럼, 기관에서 비롯된 Si (002) 회절선과 Si (004) 회절선을 제외한 나머지의 유의미한 회절선들은 격자상수 $a = 0.325$ nm와 $c = 0.521$ nm인 육방 우르자이트(wurtzite) ZnO상에서 비롯된 것으로 분석되었다. ZnO (100), (002), (101) 등의 회절선들이 관찰되는 결과로부터 ZnO 나노섬유 구조는 무방향성의 다결정질로 성장된다는 점을 알 수 있다. 또한 가능한 이차 상으로부터의 회절선들이 관찰되지 않는 것으로부터 우리는 700°C에서의 열처리 공정을 통해 순수한 ZnO 상의 나노섬유 구조를 얻을 수 있다는 점을 확인할 수 있다.

Fig. 4(a)는 무방향성 ZnO 나노섬유 구조의 표면을 보여주는데, 여기서 단일 나노섬유들은 약 50-150 nm의 두께 분포를 가진다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 형성된 ZnO 나노섬유 구조를 압착한 표면을 보여주는데, 나노섬유 구조의 윤곽은 남아있지만 전반적으로 고르게 압

Fig. 3. Typical XRD pattern of the ZnO nanofibers annealed in dry air at 700°C.

착되었음을 알 수 있다. Fig. 4(c)와 4(d)는 각각 압착 과정을 거친 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 위에 다시 전기방사법을 사용해 만들어진 무방향성 ZnO 나노섬유 구조의 표면과 측면 미세구조를 보여준다. 여러 층이 쌓인 무방향성 ZnO 나노섬유 사이로 압착된 ZnO 층을 볼 수 있다. 측면 미세구조를 보면 전체 두께는 약 4-5 μ m 이고, 압착된 층이 약 2 μ m를 이루고 있음을 볼 수 있다. 여기서, 무방향성 ZnO 나노섬유가 통기성 네트워크 구조를 형성하면서 표면 대 체적비가 상당히 증가되었음에 주목할 필요가 있다. ZnO계 가스센서의 가스 감도가 주로 ZnO 활성층의 미세구조에 의존한다⁸⁾는 사실을 감안하면, 활성 표면적이 큰 구조를 지닌 이런 종류의 ZnO 나노구조는 높은 가스 감도와 낮은 작동온도를 나타낼 수 있으리라 기대된다.

무방향성 ZnO 나노섬유 구조의 NO 가스 감지 특성을 여러 작동 온도에 대하여 NO 가스 농도를 다양하게 변화시키면서 측정하였다. Fig. 5(a)는 다섯 가지 작동 온도 150°C, 200°C, 250°C, 280°C 그리고 300°C에서 NO 농도 4 ppm에 대한 센서의 저항 곡선을 보여주는데, 센서의 반응 특성이 작동온도에 의존함을 알 수 있다. 여

Fig. 2. TG/DTA curves obtained from thermal profiles for (a) the 10 wt% PVA/DI water solution and (b) the 0.25 mol·L⁻¹ mixed solution.

Fig. 4. Typical SEM images of the ZnO nanofibers (a) before hot-pressing and (b) after hot-pressing. (c) Typical top-view and (d) cross-sectional SEM images of the doubly processed ZnO nanofibers.

Fig. 5. (a) Response curves of the ZnO nanofiber gas sensor for a NO concentration of 4ppm at several operating temperatures. (b) Response curves of the ZnO nanofiber gas sensors for various NO gas concentrations in dry air at an operating temperature of 200°C.

기서, 작동 온도가 높아짐에 따라 센서의 초기 저항이 낮아지는 현상은 ZnO의 반도체 특성에서 기인한다. 200°C로부터 온도가 올라감에 따라 저항의 상대적인 변화, 즉 가스 감도가 점차로 감소하는 추세로 관찰할 수 있다. Fig. 5(b)는 작동 온도 200°C에서 건조 공기 속 가스 농도가 2ppm에서 12ppm인 NO 가스에 노출된 무방향성 ZnO 나노섬유 가스센서의 저항 반응 곡선을 보여준다. 센서의 초기 저항은 꽤나 낮은 편이고 일정한 값을 유지하지만, NO 가스에 노출되었을 때는 저항이 급격히 증가한다. 이 현상은 ZnO 같은 *n*-형 반도체가 NO gas와 같은 산화성 가스를 감지하는 메커니즘에 의해 설명

된다. 저항 크기의 변화는 NO 농도가 증가함에 따라 점차적으로 커지는 것으로 관찰된다.

일반적으로 반도체 금속 산화물 센서의 가스 감지 메커니즘은 감지체 표면에서의 가스 흡착과 탈착으로 인한 전기 저항 또는 전도도의 변화에 근거하고 있다. 예컨대, ZnO계 가스센서가 공기에 노출되었을 때, 대기 중의 산소는 ZnO의 노출 표면에 흡착하여 ZnO 전도띠(conduction band)로부터 전도 전자를 포획함으로써 O_2^- , O^- 또는 O^{2-} 이온을 형성한다.¹⁸⁾ 그 다음에 ZnO계 센서가 NO gas와 같은 산화성 가스에 노출되었을 때, NO 가스는 ZnO 전도띠로부터 전도 전자를 포획함으로

써 N_2 분자를 생성하면서 산화물 표면에 흡착된 산소 이온들의 표면 밀도를 증가시킨다; 예를 들면, $NO + e^- \rightarrow 1/2 N_2 + O^-$. 이런 반응들은 전기 전도도를 감소시키고, 우리는 Fig. 6의 결과로부터, ZnO 나노섬유 구조 센서의 경우 복층의 구조를 가지지만 통기성 네트워크 구조를 갖는 상단부에서 주로 산소 이온들을 흡수하는 n -형 반도체 감지체로서 작동한다는 점을 미루어 짐작할 수 있다.

가스센서의 감도(sensitivity) S 는 일반적으로 건조 공기에서의 저항 R_a 에 대하여 센서가 건조 공기 속 검출 대상 가스에 노출되었을 때 일어나는 저항 변화($R_g - R_a$)의 비로 정의 된다: $S_g(\%) = |R_g - R_a|/R_a \times 100$.¹⁹⁾ 여기서, R_a 와 R_g 는 각각 건조 공기에서의 전기 저항과 검출대상 가스에 노출되었을 때의 전기 저항이다. 검출대상 가스와 감지체 사이의 흡착반응 메커니즘에 따라 센서의 저항이 증가하기도 감소하기도 하는 점을 고려하여, 가스 감도 S 는 저항 변화의 절대값을 취해 산정된다.

Fig. 6(a)는 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 가스센서의 저항 변화를 다양한 온도에서 NO 가스 농도를 변화시

켜 가면서 측정한 결과를 보여준다. 센서 저항의 상대적 변화, 즉 센서 감도가 모든 측정 온도에서 NO 가스 감도가 증가함에 따라 뚜렷한 변화를 나타내며 일관되게 증가한다는 점을 분명히 알 수 있다. 사실상, 반도체 금속산화물 가스센서의 감도는 경험적으로 다음과 같은 식으로 표현된다: $S_g = AP_g^\beta$. 여기서, P_g 는 검출대상 가스의 부분압으로 가스농도에 정비례하고, 감도는 계수 A 와 지수 β 에 의해 규정된다.¹⁹⁾ 지수 β 는, 흡착된 표면 산소 이온과 기초적인 표면 반응의 종류에 의존하여 대개 1 혹은 1/2 값을 나타낸다.¹⁹⁾ 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 가스센서의 경우에는, Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이, 전체적으로 β 의 값이 거의 1로 추정되는데, 이런 선형 관계($\beta = 1$)는 ZnO 나노섬유 구조의 경우에 작동온도들에서 흡착된 표면 산소이온이 주로 O^- 임을 시사한다.²⁰⁾ Fig. 6(b)는 무방향성 ZnO 나노섬유 구조의 가스센서가 건조 공기 속 4ppm의 NO 가스에 노출되었을 때 작동온도에 따른 감도 변화를 보여준다. 센서의 감도는 250°C에서 4ppm의 NO 가스에 노출 되었을 때 최대값 915%를 나타내었는데, 이 값은 순수한 ZnO 박막의 최대 감도보다 수 배에 이른다.⁴⁾ 또한, 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 가스센서의 최적 작동온도 200°C는 대개 300°C에서 400°C 사이에서 작동하는 통상적인 ZnO계 NO 가스센서에 비해 상대적으로 낮다는 점도 실용적인 측면에서 주목할 만하다. 작동온도 250°C 이상에서 온도가 증가함에 따라 가스 감도가 감소하는 원인은 주로 온도 증가에 따른 감지체 ZnO의 열화로 인한 반응성, 즉 저항 변화의 감소로 여겨진다.

Fig. 7은 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 가스센서가 작동온도 200°C에서 2ppm에서 12ppm까지 다양한 농도의 NO 가스에 노출되었을 때 관찰된 저항 반응 곡선을 보여준다. 반응 곡선의 가역적인 순환은 NO 가스 감지가

Fig. 6. Variations of the sensitivity for the ZnO nanofiber gas sensor (a) as a function of NO gas concentration at operating temperatures 200°C and (b) as a function of operating temperature at 4ppm NO exposure in dry air.

Fig. 7. Resistance response curves of the ZnO nanofiber gas sensor for a sequential exposure to NO gas concentration.

반복 가능하고 안정하게 작동하고 있음을 명백히 가리킨다. 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 가스센서는 가스 감도의 값이 최대값을 나타내는 250°C 보다는 200°C에서 더 우수한 온도안정성과 가스 감지의 반복 특성을 나타내었다.

반도성 금속 산화물 가스센서의 가스 감지 특성은 감지체 표면에서 일어나는 흡착 산소와 검출대상 가스 사이의 표면 반응의 종류와 세기에 달려 있다. 표면 반응은 열적 활성화되는 과정이기 때문에 반응 속도는 표면 반응이 일어나는 감지체의 단위 부피당 유효 표면의 넓이와 표면 반응의 활성화 에너지의 크기에 의존한다. 따라서 감지체의 미세구조의 기하학적 열개가 가스센서의 특성에 큰 영향을 미친다.²¹⁾ 여기서, 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 센서가 ZnO 박막 센서보다 수 배 이상의 월등히 높은 감도를 나타낸다는 사실은 실질적인 감지체 ZnO가 부피 대 표면의 비가 통기성 네트워크 구조를 가지면서 통상적인 박막 구조일 때보다 훨씬 넓은 유효 표면반응 면적을 가지게 된 덕분이라고 생각되어진다. 물론 가스의 감지 특성은 표면반응 면적 외에 결정성과 다른 표면 특성에 의존하기도 하는데, 이런 효과에 대해서는 더 연구할 필요가 있다.

4. 결 론

전기방사 방법을 이용하여 나노섬유를 만들고 압착시킨 후 다시 전기방사 시켜 나노섬유를 만드는 이중 공정으로 제작된 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 가스센서의 NO 가스 감지 특성을 조사하였다. 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 가스센서는 전체적으로 NO 가스 감지 특성이 향상되어 뛰어난 NO 가스 감지 특성을 관찰할 수 있었다. 특히, 이런 새로운 형태의 ZnO계 센서는 상대적으로 낮은 작동온도 200°C에서 상당히 높은 최대 감도를 나타내는 동시에 꽤 낮은 농도의 NO 가스에 대해 매우 민감하고 가역적인 반응을 나타낸다. 무방향성 ZnO 나노섬유 구조 가스센서의 훌륭한 NO 가스 감지 특성은 주로 감지체가 갖는 통기성 네트워크 구조에서 기인한다고 여겨진다. 따라서 아주 단순한 합성 공정으로 제작된 무방향성 ZnO 나노 섬유 구조 가스센서가 보다 낮은 온도에서 작동 가능한 저비용 고성능 NO 가스 가스센서의 제작에 유용하게 활용될 수 있음을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 국가지정연구실 사업 및 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2012-0004721).

참 고 문 헌

1. D. Zhang, Z. Liu, C. Li, T. Tang, X. Liu, S. Han, B. Lei and C. Zhou, *Nano Lett.*, **4**, 1919 (2004).
2. I. D Kim, A. Rothschild, B. H. Lee, D. Y. Kim, S. M. Jo and H. L. Tuller, *Nano Lett.*, **6**, 2009 (2006).
3. T. Seiyama, A. Kato, K. Fujiishi and M. Nagatani, *Anal. Chem.*, **34**, 1502 (1962).
4. N. Koshizaki and T. Oyama, *Sens. Actuators B*, **66**, 119 (2000).
5. M. S. Wagh, G. H. Jain, D. R. Patil, S. A. Patil and L. A. Patil, *Sens. Actuators B*, **115**, 128 (2006).
6. S. Basu and A. Dutta, *Sens. Actuators B*, **22**, 83(1994).
7. J. F. Chang, H. H. Kuo, I. C. Leu and M. H. Hon, *Sens. Actuators B*, **84**, 258 (2002).
8. Y. Min, H. L. Tuller, S. Palzer, J. Wollenstein and H. Bottner, *Sens. Actuators B*, **93**, 435 (2003).
9. J. Xu, Q. Pan, Y. Shun and Z. Tian, *Sens. Actuators B*, **66**, 277 (2000).
10. T. Gao and T. H. Wang, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, **80**, 1451 (2005).
11. Z. Fan and J. G. Lu, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **5**, 1561 (2005).
12. A. Og. Dikovska, P. A. Atanasov, S. Tonchev, J. Ferreira and L. Escoubas, *Sens. Actuators A*, **140**, 19 (2007).
13. S. -M. Park, S. -L. Zhang and J. -S. Huh, *Kor. J. Mater. Res.*, **18**, 367 (2008) (in Korean).
14. D. Li and Y. Xia, *Adv. Mater.*, **16**, 1151 (2004).
15. J. Doshi and D. H. Reneker, *J. Electrostatics*, **35**, 151 (1995).
16. A. Greiner and J. H. Wendorff, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **46**, 5670 (2007).
17. 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).
18. M. Che and A. J. Tench, *Adv. Catal.*, **31**, 77 (1982).
19. R. W. J. Scott, S. M. Yang, G. Chabanis, N. Coombs, D. E. Williams and G. A. Ozin, *Adv. Mater.*, **13**, 1468 (2001).
20. S. C. Naisbitt, K. F. E. Pratt, D. E. Williams and I. P. Parkin, *Sens. Actuators B*, **114**, 969 (2006).
21. S. Ahlers, G. Muller and Th. Doll, *Encyclopedia of Sensors*, p. 413, ed. by C. A. Grimes, E. C. Dickey and M. V. Pishko, American Scientific Publishers, USA (2006).