

금속 산화물 반도체 나노구조의 합성과 가스 감응 특성

최권일¹, 이종훈^{1,a}

¹ 고려대학교 신소재공학과

Synthesis of Metal Oxide Semiconductor Nanostructures and Their Gas Sensing Properties

Kwon-Il Choi¹ and Jong-Heun Lee^{1,a}

¹ Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received July 3, 2012; Revised July 20, 2012; Accepted July 24, 2012)

Abstract: The preparation of various metal oxide nanostructures via hydrothermal method, hydrolysis, thermal evaporation and electrospinning and their applications to chemoresistive sensors have been investigated. Hierarchical and hollow nanostructures prepared by hydrothermal method and hydrolysis showed the high response and fast responding kinetics on account of their high gas accessibility. Thermal evaporation and electrospinning provide the facile routes to prepare catalyst-loaded oxide nanowires and nanofibers, respectively. The loading of noble metal and metal oxide catalyst were effective to achieve rapid response/recovery and selective gas detection.

Keywords: Hydrothermal method, Hydrolysis, Thermal evaporation, Electrospinning, Nanostructure, Catalyst

1. 서론

가스센서는 일산화탄소, 에탄올, 프로판, 휘발성 유기화합물, 질소산화물, 독성가스 등의 위험·유해가스를 감지하며 자동차, 반도체, 계측기기 산업에서 핵심적인 역할을 담당하고 있다. 가스센서는 현재 다양한 분야에서 상용화된 상태이며, 다양한 가스 감지 물질을 one-chip으로 집적화할 경우 전자기기, 개인용 이동통신기에 적용하여 인공후각, 스마트홈, 유비쿼터스 센서 네트워크, 미래형 자동차 산업에서 중추적인 역할을 담당할 것으로 기대된다.

가스센서의 핵심 특성은 가스 감도, 응답속도, 선택성이다. 가스 감도를 증가시키기 위해서는 입자의 크기를 수-수십 nm 크기로 줄이는 것이 필요하다. 그러나, 입자가 작아질 경우 응집이 심해지므로 모든

입자가 가스 감응반응에 참여하지 못하게 된다. 이 경우 가스가 응집이차입자 내부로 확산하는 데 장시간이 소요되어 응답시간이 길어지는 문제가 있다. 반대로 응집을 줄여 빠른 응답속도를 얻기 위해서는 큰 입자가 이용되므로 가스 감도가 저하된다.

표면/계면 반응을 이용한 환경가스센서 소자 특성을 향상시키기 위해 높은 비표면적의 다공성 나노구조체가 널리 연구되고 있다. 다공성 나노 구조는 2차원 나노구조, 1차원 나노구조, 0차원 나노입자 등이 더 높은 차원의 구조체로 자기 조립되어 저차원 나노구조체 간 공간을 확보하여 높은 비표면적을 유지하면서도 나노 구조체간의 응집이 적은 것이 핵심 특성이다. 다공성 나노 구조는 기존의 나노 구조체와는 달리 표면/계면 반응을 극대화하는 동시에 반응 가스 및 이온의 확산이 용이하므로 가스 감지 시 반응속도와 회복특성을 획기적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

a. Corresponding author: jongheun@korea.ac.kr

반도체형 가스센서의 또 다른 핵심 특성인 선택성은 반도체형 가스센서가 가지고 있는 가장 해결하기 어려운 난제로 남아있다. 현재 가장 널리 연구되고 있는 n-type 반도체형 가스센서의 경우 C_2H_5OH 와 같은 특정 가스에 큰 감응성을 나타내지만 이외의 가스 감지를 어렵게 하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점은 귀금속 또는 산화물 촉매를 이용한 다공성 나노 구조체를 통해 여러 개선된 연구결과가 보고되고 있다 [1-3]. 촉매를 첨가하여 표면 개질된 나노 구조체는 선택성뿐만 아니라 가스 감응 속도에도 영향을 미쳐 초고속 회복 특성을 나타내기도 한다 [4].

산화물 나노선은 결정성이 우수하고 비표면적이 높아 고감도 가스 센서의 장기 안정성 면에서 우수한 성능을 보일 것으로 기대된다. 특히 결정질 나노선의 네트워크 구조는 응집이 거의 없기 때문에 피검가스가 전 센서 표면으로 효과적으로, 빠르게 확산되므로 감도가 크고, 응답속도가 빠른 장점이 있다. 또 단결정 나노선의 경우 일반적으로 $700^\circ C$ 의 고온에서 합성되기 때문에 고온의 동작온도에서 장시간 동작 후에도 안정적인 감응 신호를 얻을 수 있다. Sysoeve [5] 등은 나노 입자 (평균입경 4 nm) 후막 및 나노선 네트워크를 가스 센서로 제조한 뒤, 이들 센서의 장기 안정성을 평가했다. 나노 입자 가스센서의 경우에는 센서 동작 초기 12일 동안 가스 감응 특성이 현저히 열화되는 반면, 결정질의 나노선의 경우, 장기간의 동작에도 불구하고 매우 안정적인 가스 감응 특성을 나타내었다. 이는 나노선 네트워크를 이용할 경우 장기 안정성이 우수한 고신뢰성의 가스센서 제조의 가능성을 보여준다.

본고에서는 수열합성 및 수화반응을 이용하여 SnO_2 , ZnO , Co_3O_4 등의 산화물 반도체를 다양한 다공성 나노 구조체로 합성하는 방법과 이를 이용한 가스 감응 소자 응용성에 대하여 연구한다.

2. 실험 방법

2.1 계면활성제를 이용한 다공성 나노 구조체의 설계와 합성

다공성 나노 구조는 2, 1, 0차원의 단위 나노구조가 고차원의 형태로 모여 있는 것이므로 자기조립 (self assembly)의 방법이 효과적이다. 자기조립을 이용한 나노 계층구조를 합성하기 위해서는 한쪽 끝이 극성

을 나타내고 다른 쪽은 비극성 유기물 체인으로 구성되어 있는 양이온 계면활성제가 필요하다. 주로 CTAB (cetyltrimethylammonium bromide), CTAC (cetyltrimethylammonium chloride) 등이 이용될 수 있다. 양전하를 띠는 양이온 계면활성제는 양쪽의 끝이 음전하를 띠면서 중간부분은 유기물질의 체인으로 이루어진 구조체와 정전기적으로 결합하여 체인의 길이가 길어지면서 머리 부분이 음전하로 전환 가능하다. 이후 머리 부분이 음전하를 띠는 체인은 금속양이온과 결합하여 나노 빌딩블록을 형성한다. 나노 빌딩블록은 금속양이온과 음이온 계면활성제의 결합으로도 생성 가능하다. 수열합성 초기에 핵생성을 유발할 수 있는 금속미립자가 있을 경우 핵 부분부터 방사상으로 자기 조립되므로 3차원의 다공성 나노구조체를 형성한다. 단위 나노구조의 차원은 합성되는 물질의 결정구조 및 나노 빌딩블록의 3차원적 결합 방법에 의해 결정된다. 예를 들어 SnO_2 나노 계층구조를 합성할 때, 환원제를 같이 첨가할 경우 Sn_3O_4 또는 SnO 의 상이 형성될 수 있는데, Sn_3O_4 의 경우에는 3차원 나노 구조체가, SnO 상의 경우에는 2차원의 나노 구조체가 형성된다 [6,7]. 따라서, 나노 구조 내의 단위 나노구조 차원은 산화제/환원제 첨가 또는 나노빌딩 블록의 설계에 의해 조절된다. 핵생성제가 없을 경우에는 소수성을 나타내는 꼬리 부분이 내부로 들어간 micelle 구조가 형성될 수 있으며, 이와 같은 전구체를 열처리할 경우 내부가 중공 구조체의 합성도 가능하다.

2.2 수화조절을 이용한 다공성 나노 구조체의 설계와 합성

템플레이트를 이용한 수화조절 반응은 간단한 공정으로 균일하게 산화물을 코팅할 수 있으며, 수화반응의 시간조절을 통해 나노 구조체의 두께를 재현성 있게 조절할 수 있다. 구형의 폴리머 또는 금속 템플레이트를 이용하여 산화물 층을 코팅할 경우, 내부 템플레이트를 제거함으로써 속이 빈 중공 구조체가 합성된다 [8]. 금속 템플레이트를 산으로 제거하기 전에 일정 부분의 금속을 열처리하여 산화물로 변환시킬 경우, 내부에 금속산화물이 균일하게 도포된 중공 구조체가 합성된다 [9]. 이렇게 합성된 나노 구조체는 가스센서 응용 시 피검 가스의 확산을 촉진하고, 구조체 내부에 균일하게 도포된 금속 산화물 및 귀금속 나노입자를 이용하여 가스감응 표면반응을 극대화하

여 초고속, 고감도 가스센서를 달성할 수 있다. 이때, 템플레이트로 이용되는 금속입자는 촉매활성이 우수한 것으로 설계되어야 한다.

2.3 기상화학증착 및 전기방사를 이용한 산화물 나노선 또는 나노섬유의 설계와 합성

기상화학증착 및 전기방사법은 1차원 산화물 구조를 가장 손쉽게 합성할 수 있는 방법이다.

1차원 나노선의 일반적인 합성 방법은 다음과 같다. Au를 일정두께로 증착시킨 기판을 금속 또는 graphite와 금속산화물의 혼합물과 함께 가열로의 튜브에 위치시키고 튜브를 진공으로 만든 후 금속 또는 금속산화물이 기화될 수 있는 온도까지 가열한다. 이후 산소, 아르곤 또는 그 혼합가스를 흘려주어 기화된 금속 또는 금속산화물이 Au가 증착된 기판위에 나노선의 형태로 성장시킨다. 이와 같이 형성된 나노선은 고온에서 합성되기 때문에 물질의 안정성이 높고 구조 특성상 후막으로 만들어질 경우 막 내부에 기공을 형성하여 피검 가스 검지 시 가스의 확산이 원활하도록 돕는다. 최근에는 1차원의 단일성분 나노선 뿐 아니라 나노선 위에 또 다른 나노선을 성장시킨 계층 구조형 3차원 나노선 [10], 또는 2중 성분 코어-셸 나노선 [11] 등이 연구되고 있다.

전기방사의 경우 물질의 종류에 영향을 받지 않고 다양한 종류의 금속산화물을 나노 섬유형태로 합성할 수 있는 큰 장점을 가진다. 물질의 고유 특성이 아닌 액상의 점성과 노즐을 이용하기 때문에 액상에 첨가 물질을 조절하여 어떠한 물질이라도 전기방사를 할 수 있다. 또한 액상을 만들 시 촉매를 자유로이 첨가할 수 있기 때문에 금속산화물에 촉매를 첨가하기가 매우 용이하다.

전기방사가 가능한 액상의 제조방법은 다음과 같다. 에탄올 또는 다이메틸포름아마이드와 같은 유기 용매에 금속전구체를 녹인 후 액상의 점성을 조절하기 위하여 폴리비닐피리리돈과 같은 유기물을 첨가한다. 위 유기물의 농도를 조절하면 전기방사에 적합한 액상의 점성을 만들 수 있다. 이후 노즐을 통해 전기장이 형성된 기판위에 분사하면 손쉽게 나노섬유를 형성할 수 있다. 최근에는 일반적인 나노섬유 뿐만 아니라 내부가 비어있는 중공구조의 나노섬유 [12] 또는 내부에 촉매가 첨가된 나노섬유 [13] 등의 합성이 보고되고 있다.

2.4 귀금속 및 금속 산화물을 첨가한 나노 구조체 표면 개질을 통한 가스 감응 특성 개선

수열합성, 템플레이트를 이용한 수화반응, 열증착 등의 방법을 통해 최적화된 다공성 나노 구조체의 표면을 Pt [14], Pd [2], Ru [15], Rh [3] 등의 귀금속 촉매와 NiO [9], CuO [1,2], Fe₂O₃ [16] Co₃O₄ [17] 등의 산화물 촉매를 이용하여 개질함으로써 물질 표면에서 피검가스 및 산소의 분해 및 반응을 촉진하여 가스의 반응 및 회복속도를 개선하거나 가스 감응성을 증가시킨 연구가 보고되고 있다. 표면 개질된 감응 물질에서 피검가스 및 산소의 반응성 및 반응속도는 촉매의 농도 및 분포에 의해 크게 영향을 받으므로 이를 조절하여 가스 감응 특성이 결정된다. 자기조립을 통한 나노 구조체 합성 시, 자기조립을 이끄는 단위블럭이 촉매의 분포도를 조절할 수 있으며 템플레이트를 이용한 나노 계층구조 합성 시에는 촉매의 첨가 단계를 조절함으로써 촉매의 위치를 조절할 수 있다. 이 외에도 기상화학증착을 통한 나노선 구조는 2-step 공정을 통해, 전기방사를 통한 나노섬유 구조는 액상단계에서 촉매물질을 첨가함으로써 표면을 개질할 수 있다. 상기의 방법으로 형성한 표면 개질 나노 계층구조를 이용하여 표면반응을 활성화해 개선된 가스 감응 특성을 발현할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수열합성을 이용한 다공성 나노 구조체의 합성 및 가스 감응 특성

SnCl₂, 옥살산, 하이드라진을 포함하는 수용액을 수열합성하여, 2차원의 나노구조가 자기조립되어 3차원의 구형을 띠는 Sn₃O₄ 나노계층 구조를 합성하고, 이를 열처리 하여 SnO₂로 변환하였다. 옥살산이 소량 첨가되었을 경우 2차원의 나노쉬트가 3차원의 구형으로 조립된 다공성 계층구조가 합성된 반면 (그림 1 (a)), 옥살산의 첨가량이 증가할 경우 0차원의 나노입자가 응집된 치밀한 구형입자 (그림 1(b))가 합성되었다. 일반적으로 2차원 모양의 1차 입자는 두께 수 십 나노미터 정도로 매우 얇아 매우 큰 반데르발스 힘에 의해 큰 2차 응집체를 형성한다. 그러나 적정농도의

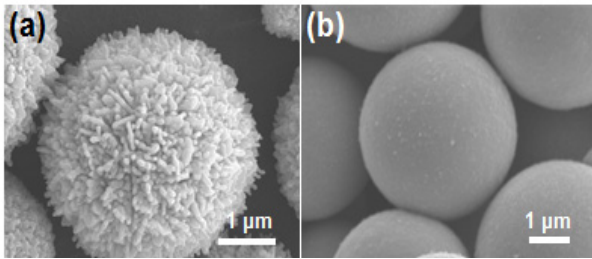


Fig. 1. SEM images of (a) porous hierarchical structure, (b) agglomerated sphere after heat treatment at 600°C.

옥살산에 의해 계층구조로 자기 조립되어 응집 후에도 높은 비표면적을 유지하면서도 기공도를 잃지 않는다. 사용된 옥살산은 pH 2 이상에서 음이온을 형성하는 카르복실기가 두 개 연결된 분자 구조를 가지고 있어 용매로 사용된 증류수에 첨가될 때 자기조립을 유도할 수 있는 이온화 카르복실기를 형성한다. 따라서, 나노 계층구조를 형성하는데 옥살산이 중요한 역할을 하는 것으로 판단되며, 그 농도가 응집체의 구조를 결정하는 것으로 나타났다. 합성된 두 구조체 모두 600°C 하소 후 구조의 크기 및 모양에 변화가 전혀 없어 합성 직후 매우 안정한 전구체가 합성되는 것으로 보인다.

구조체 형성 후, SnO₂ 다공성 계층구조 및 응집구조의 크기는 두 구조체 모두 평균 3 μm이며 상분석 결과 역시 동일한 SnO₂상을 가지고 있어 두 구조체 사이에 나타나는 가스 감응 특성 차이는 표면 구조 차이에 의한 것으로 예상된다. 해당 나노 계층구조의 C₂H₅OH 30 ppm에 대한 응답시간은 1초로 매우 빠른 반응속도를 보이고 있으며 (동작 온도 400°C), 응집 2차 구형입자의 경우 90초로 상대적으로 매우 느린 반응성을 나타내었다. 다공성 구조는 응집입자에 비해 C₂H₅OH 감도도 2.5배 크게 나타났다. 이는 비표면적이 크고, 응집이 적은 다공성 계층구조가 고속응답과 고감도를 동시에 달성하기 위한 매우 우수한 물질임을 보편적으로 보여주는 결과이다.

3.2 수화조절을 이용한 다공성 나노 구조체의 합성 및 가스 감응 특성

SnCl₂, 옥살산, 하이드라진을 포함하는 수용액에 구형 Ni 금속 템플레이트를 첨가한 후 수화반응을 조절하여 Ni 금속 템플레이트 표면에 Sn 전구체를 코팅

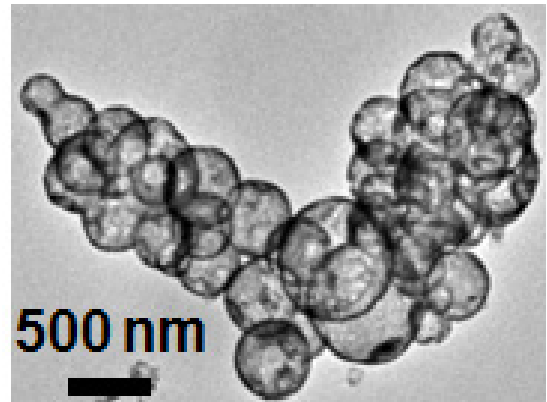


Fig. 2. TEM image of SnO₂ hollow sphere after removal of Ni core by HCl.

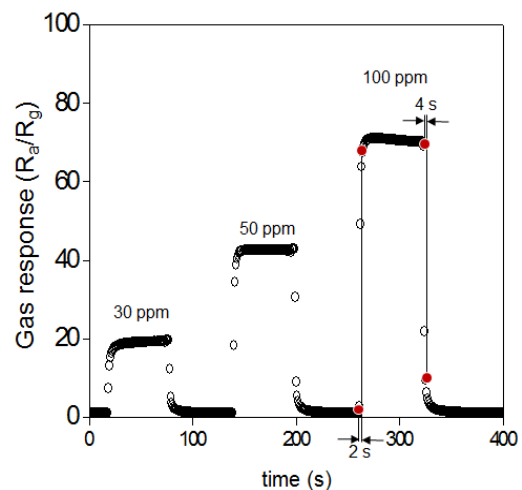


Fig. 3. Gas response change (R_a/R_g) of SnO₂ hollow sphere exposure to C₂H₅OH at 450°C.

하고 열처리하여 SnO₂층이 코팅된 구조체를 합성하였다. 수화반응을 통해 합성된 Ni-Sn core-shell 구조는 적정 온도와 시간 동안 열처리를 통해 Ni-NiO-SnO₂ multi core-shell 구조를 형성하게 되고 내부의 가장 중심에 존재하는 Ni는 산성용액을 이용하여 선택적으로 제거함으로써 SnO₂ 중공 내면이 NiO로 기능화된 나노 중공구조가 합성된다 (그림 2). 합성된 중공구조의 직경은 템플레이트 크기와 거의 동일하며 shell 두께는 약 20 nm로 매우 얇은 두께를 이루고 있다. 또한 중공의 표면에 많은 미세기공이 존재하여 감응가스가 나노구조의 전표면으로 매우 빨리 확산되므로 초고속의 응답속도를 얻을 수 있다.

NiO는 p-type 반도체 물질이며 SnO₂는 n-type 반도체 물질로써 두 물질 사이에 형성되는 p-n junction은 물질의 기저저항, gas sensitivity, gas response 및 recovery time에 큰 영향을 준다. 합성된 구조는 에탄올 100 ppm 가스에 대하여 약 70의 높은 감응성을 가지며, 90% 응답 시간 2초, 90% 회복 시간이 4초에 완료되는 획기적인 응답/회복 속도를 나타낸다 (그림 3). 특히 NiO 촉매는 회복 시의 산소흡착 관련 표면 반응을 획기적으로 향상시키는 역할을 하는 것으로 판단된다. 동시에 p-n 접합으로 인한 저항의 증가현상도 함께 나타난다.

3.3 기상화학증착 및 전기방사를 이용한 산화물 나노선 또는 나노섬유의 합성 및 가스 감응 특성

ZnO와 graphite의 mixture를 기상화학증착법을 이용하여 900°C에서 ZnO 나노선을 합성했다. 합성된 ZnO 나노선에 600°C에서 Co 성분을 위와 같은 동일한 방법을 통해 증착하여 ZnO-CoO core-shell 구조를 합성하였다. 직경 약 100 nm의 ZnO-CoO core-shell 나노선 구조가 합성되었으며 TEM image를 통하여 ZnO core, CoO shell 구조를 확인하였다 (그림 4). 나노선의 core 부분 SEAD 패턴 확인 결과 ZnO의 회절 패턴을 보이며 shell 부분의 SEAD 패턴은 CoO 회절 패턴을 보이고 있다. 나노선의 단면을 line mapping한 결과 O의 분포는 core 부분부터 shell 부분까지 균일하지만 Zn의 분포는 core에 밀집해 있고 Co의 분포는 나노선의 shell 부분에 밀집해 있어 ZnO-CoO core-shell 구조임을 증명한다. CoO shell의 두께는 약 15 nm로 매우 얇게 형성되었다. X-ray 회절 분석을 통하여 ZnO와 CoO의 상이 모두 확인되었으며 (그림 5) ZnO상의 회절 패턴이 CoO상의 회절 패턴보다 높은 강도를 보여 ZnO core와 CoO shell의 비율과 비슷한 경향을 보였다.

원료물질 SnCl₂ 및 polyvinylpyrrolidone을 ethyl alcohol과 N, N-dimethylformamide의 혼합용매에 첨가한 후 다양한 조성의 촉매염을 추가로 첨가한 용액을 만들었다. 이 용액을 차례로 plastic syringe에 넣고 metallic nozzle에 연결 후 고전압을 가해 전기방사를 실행하였다. 이후 열처리하는 방법으로 내부가 비어있는 다결정질의 SnO₂ 나노파이버를 합성하였다 (그림 6). 합성 시 Pd 전구체를 첨가하여 0.1 wt% Pd 첨가 SnO₂ 중공 나노파이버를 합성하였으며, 이에 대한 환원성 가스 감응성을 평가했다 (그림 7).

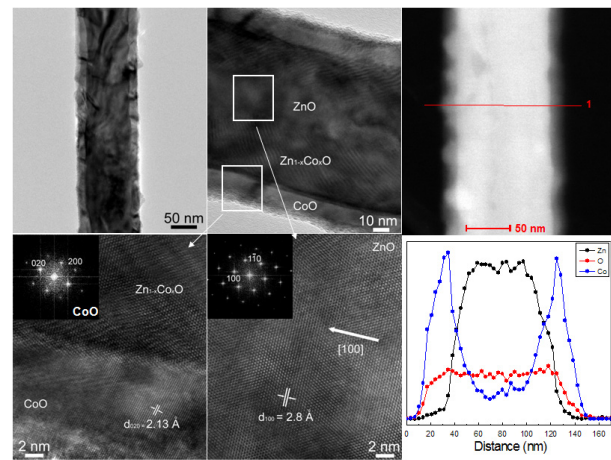


Fig. 4. TEM images of ZnO-CoO core-shell nanowire and elemental line mapping.

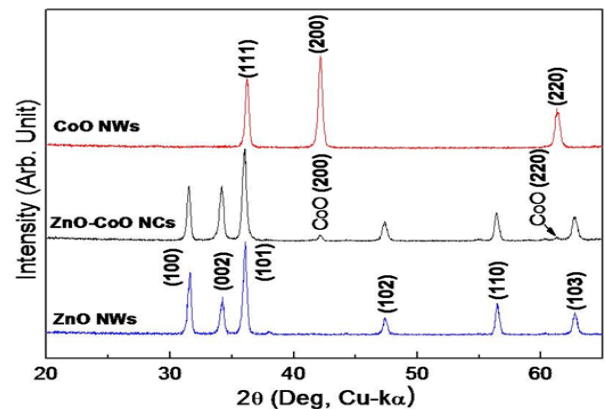


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of ZnO, CoO nanowires and ZnO-CoO core-shell nanowire.

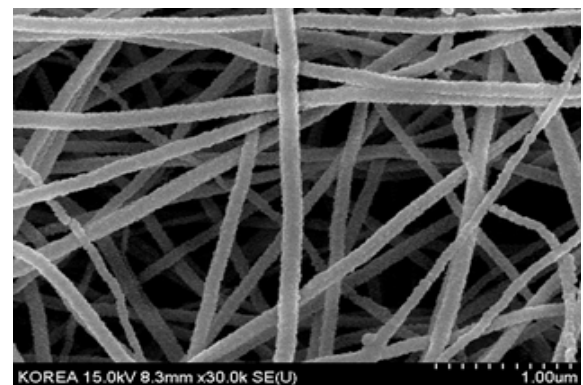


Fig. 6. SEM image 0.1 wt% Pd-doped SnO₂ hollow nanofiber.

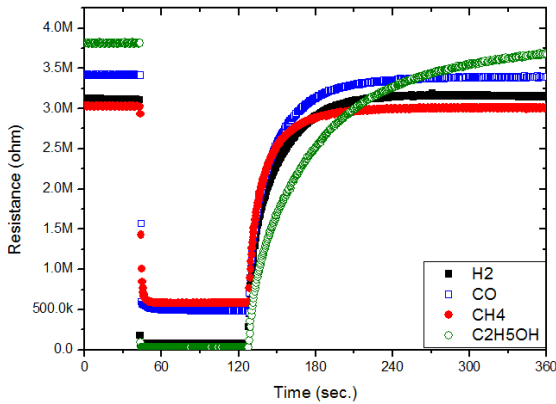


Fig. 7. Resistance change of 0.1 wt% Pd doped SnO₂ hollow nanofiber exposure to 100 ppm H₂, 100 ppm CO, 500 ppm CH₄, and 100 ppm C₂H₅OH at 440°C.

0.1 wt% Pd가 첨가된 SnO₂ 중공 나노파이버 가스 센서를 440°C에서 동작할 경우 100 ppm 에탄올에 대해서는 $R_a/R_g = 125.5$, 100 ppm 수소에 대해서는 $R_a/R_g = 40.7$ 로 나타난 반면, 100 ppm CO 및 500 ppm CH₄에 대해서는 R_a/R_g 값이 7.4, 5.2로 나타났다. 이는 Pd의 첨가 시 에탄올 또는 고농도의 수소에 대한 선택성을 얻을 수 있음을 보여준다.

3.4 귀금속 및 금속 산화물을 첨가한 나노 구조체 표면 개질을 통한 가스 감응 특성 개선

알루미나 기판위에 형성된 Au 전극위에 직접적으로 ZnO 나노선 네트워크를 형성하고, 이후에 p-형 반도체인 Co₃O₄ 나노 spot을 ZnO 나노선 상에 균일하게 형성했다. 렌즈 모양의 p-형 반도체가 n-형 ZnO 나노선 위에 균일하게 도포될 경우 p-n 접합 (p-Co₃O₄)/(n-ZnO)이 형성되어 나노선의 저항이 약 10배 이상 증가되었으며, 이를 이용하여 고감도 센서를 구현하였다. 합성된 구조체는 C₂H₅OH 및 NO₂를 선택적으로 감응할 수 있으며, 가스 감도가 C₂H₅OH 농도에 비례적으로 증가하여 선형적인 센서를 구현할 수 있고 5 ppm 이하의 저농도의 C₂H₅OH를 선택적으로 감지할 수 있다 (그림 8). 또한 한 센서 물질을 이용하여 NO₂와 C₂H₅OH를 다른 동작온도에서 각각 선택적으로 감응할 수 있다.

합성된 순수한 ZnO 나노선의 경우 저온에서 가스 감응 특성을 평가할 경우 산화성 가스인 NO₂에 대한

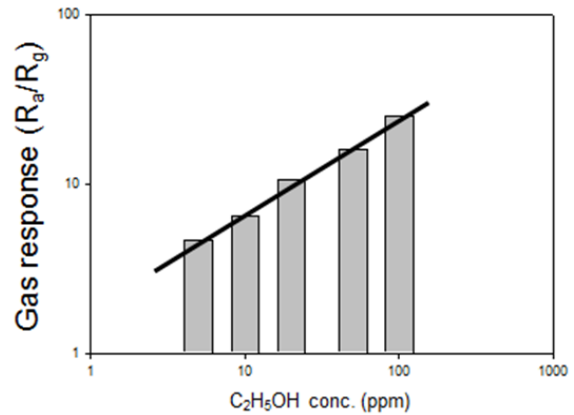


Fig. 8. Gas response change (R_a/R_g) of Co₃O₄-decoreated ZnO nanowire exposure to C₂H₅OH at 450°C as a function of the gas concentration.

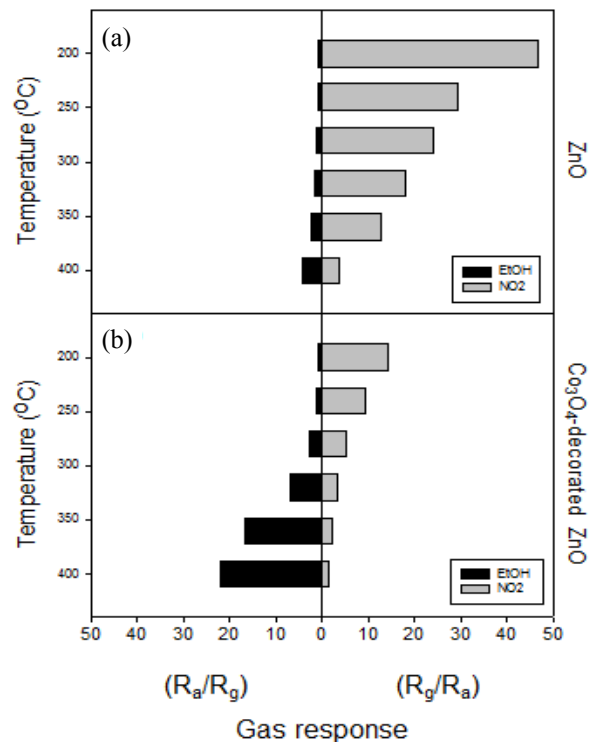


Fig. 9. Gas response change of (a) ZnO, (b) Co₃O₄-decoreated ZnO nanowire exposure to C₂H₅OH and NO₂ as a function of the sensing temperature.

감응성이 타 가스에 비해 월등히 크게 나타나 NO₂ 가스에 대한 선택적 감응이 가능하다. 하지만 동작온

도가 고온으로 증가할수록 NO₂ 가스에 대한 감응도가 낮아지면서 환원성 가스인 C₂H₅OH를 비롯한 다른 가스들 사이에서 선택적 검지가 어려워 진다 (그림 9 (a)). 때문에 순수한 ZnO 나노선의 경우 NO₂ 외의 가스는 측정하기 어렵다는 문제점이 발생한다. 반면에 Co₃O₄-decorated ZnO 나노선의 경우 저온에서 순수한 ZnO와 동일하게 NO₂ 가스에 C₂H₅OH 가스 대비 높은 감응도를 나타내며 선택적 감응이 가능하고, 뿐만 아니라 고온의 동작온도에서는 NO₂ 가스에 대한 감응도 감소와 함께 C₂H₅OH 가스에 대한 감응도 증가가 동시에 일어나 종래에는 감응도 역전이 일어나게 된다 (그림 9(b)). 이를 통해 동작온도를 조절함으로써 하나의 물질로 NO₂ (저온 감지) 및 C₂H₅OH 가스를 (고온 감지) 동시에 선택적으로 검지할 수 있다.

4. 결론

수열합성을 통해 다공성의 다양한 계층구조를 가지는 금속산화물을 합성할 수 있으며 이러한 구조체를 가스 센서에 응용할 경우 가스의 확산 및 표면반응을 촉진하여 개선된 가스 감응 특성을 얻을 수 있다. 템플레이트를 이용한 수화반응 시 템플레이트 구조에 따라 다양한 중공 구조체를 합성할 수 있으며, 첨가하는 템플레이트를 선택적으로 사용함으로써 중공 구조체 내부에 촉매를 도포할 수 있어 내부 표면 개질을 통해 개선된 가스 감응 특성을 얻을 수 있다.

기상화학증착 및 전기방사를 이용한 나노선 및 나노파이버 합성은 표면 개질이 손쉬워 가스 감응 특성을 향상시키는데 용의하다. 나노선 합성의 경우 원료물질과 촉매물질의 기화온도차이를 이용하여 다양한 표면개질이 가능하고 나노파이버 합성의 경우 전기방사 전에 단순히 촉매 물질을 첨가함으로써 표면개질이 가능하다. 나노구조체의 표면개질은 반도체형 가스센서의 가장 큰 문제점인 가스 감응 시 선택성을 부여하고 반응 및 회복속도를 개선함으로써 초고속 가스 검지를 가능케 한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천 기술개발사업 (M2008010013)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] I. S. Hwang, J. K. Choi, S. J. Kim, K. Y. Dong, J. H. Kwon, B. K. Ju, and J. H. Lee, *Sensor. Actuat.*, **B142**, 105 (2009).
- [2] J. K. Srivastava, P. Pandey, V. N. Mishra, and R. Dwivedi, *Solid State Sciences*, **11**, 1602 (2009).
- [3] S. J. Kim, I. S. Hwang, C. W. Na, I. D. Kim, Y. C. Kang, and J. H. Lee, *J. Mater. Chem.*, **21**, 18477 (2011).
- [4] Z. Bai, C. Xie, M. Hu, and S. Zhang, *Physica. E*, **41**, 235 (2008).
- [5] V. V. Sysoev, T. Schneider, J. Goschnick, I. Kiselev, W. Habicht, H. Hahn, E. Strelcov, and A. Kolmakov, *Sensor. Actuat.*, **B139**, 699 (2009).
- [6] H. R. Kim, K. I. Choi, J. H. Lee, and S. A. Akbar, *Sensor. Actuat.*, **B136**, 138 (2009).
- [7] C. S. Moon, H. R. Kim, G. Auchterlonie, J. Drennan, and J. H. Lee, *Sensor. Actuat.*, **B131**, 556 (2008).
- [8] C. Wang, C. Xiangfeng, and W. Mingmei, *Sensor. Actuat.*, **B120**, 508 (2007).
- [9] H. R. Kim, K. I. Choi, K. M. Kim, I. D. Kim, G. Cao, and J. H. Lee, *Chem. Commun.*, **46**, 5061 (2010).
- [10] J. Qiu, M. Guo, Y. Feng, and X. Wang, *Electrochim. Acta*, **56**, 5776 (2011).
- [11] M. Shi, X. Pan, W. Qiu, D. Zheng, M. Xu, and H. Chen, *Inter. J. Hydrogen Energy*, **36**, 15153 (2011).
- [12] N. G. Cho, D. J. Yang, M. J. Jin, H. G. Kim, H. L. Tuller, and I. D. Kim, *Sens. Actuators B*, **160**, 1468 (2011).
- [13] J. Moon, J. A. Park, S. J. Lee, T. Zyung, and I. D. Kim, *Sensor. Actuat.*, **B149**, 301 (2010).
- [14] G. Neri, A. Bonavita, G. Micali, N. Donato, F. A. Deorsola, P. Mossino, I. Amato, and B. D. Benedetti, *Sensor. Actuat.*, **B117**, 196 (2006).
- [15] Z. Zhu, R. C. Deka, A. Chutia, R. Sahnoun, H. Tsuboi, M. Koyama, N. Hatakeyama, A. Endou, H. Takaba, C. A. D. Carpio, M. Kubo, and A. Miyamoto, *J. Phy. Chem. Solids*, **70**, 1248 (2009).
- [16] H. J. Kim, K. I. Choi, A. Pan, I. D. Kim, H. R. Kim, K. M. Kim, C. W. Na, G. Cao, and J. H. Lee, *J. Mater. Chem.*, **21**, 6549 (2011).
- [17] C. W. Na, H. S. Woo, I. D. Kim, and J. H. Lee, *Chem. Commun.*, **47**, 5148 (2011).