



Pd 나노입자가 코팅된 β - Bi_2O_3 나노와이어의 NO_2 검출 특성

박성훈^a, 강우승^{b*}

^a인하대학교 신소재공학과, ^b인하공업전문대학 금속재료과

NO_2 Sensing Properties of β - Bi_2O_3 Nanowires Sensor Coated with Pd Nanoparticles

Sunghoon Park^a, Wooseung Kang^{b*}

^aDepartment of Materials Science & Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

^bDepartment of Metallurgical & Materials Engineering, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

(Received December 8, 2015 ; revised December 17, 2015 ; accepted December 18, 2015)

Abstract

Pd-functionalized β - Bi_2O_3 nanowires are synthesized by thermal evaporation of Bi powder using VLS mechanism followed by Pd coating and annealing. In this study, sensing properties of Pd-functionalized β - Bi_2O_3 nanowires sensor to selected concentrations of NO_2 gas were examined. Scanning electron microscopy showed that the nanowires with diameters in a range of 100 - 200 nm and lengths of up to a few tens of micrometers. Transmission electron microscopy and X-ray diffraction confirmed that the products corresponded to the nanowires of β - Bi_2O_3 crystals and Pd nanoparticles. Pd-functionalized β - Bi_2O_3 nanowires sensor showed an enhanced sensing performance to NO_2 gas compared to as-synthesized β - Bi_2O_3 nanowires sensor. As synthesized and Pd-functionalized β - Bi_2O_3 nanowire sensors showed responses of 178% - 338% and 196% - 535% at 300°C, respectively, to 0.05 - 2 ppm NO_2 . In addition, the underlying mechanism of the enhancement of the sensing properties of β - Bi_2O_3 nanowires by Pd-functionalization is discussed.

Keywords : β - Bi_2O_3 , nanowires, Pd, NO_2 , gas sensor

1. 서 론

1차원 구조의 나노 물질은 그 독특한 물리적 특성으로 인하여 최근 수십 년 간 많은 관심을 받아 왔다¹⁾. 특히, 이러한 구조를 기반으로 하는 반도체 물질은, 극대화된 부피 대 표면적과 광학적 및 전기화학적 특징으로 인하여 수많은 응용 소자로 이용되어져 왔다^{2,3)}. 특히 산화물 반도체의 경우, 각종 화학 가스에 민감하게 반응하여 그 전기적 특성이 변화하는데, 이러한 특징으로 인하여 각종 가스 센서의 응용이 활발히 연구되고 있다^{4,6)}. 이러한 나

노 물질의 경우 그 형태에 따라서, 나노선⁷⁾, 나노 튜브⁸⁾, 나노 리본⁹⁾, 그리고 나노 입자¹⁰⁾ 등이 있는데, 이 중 나노선의 경우, 용도와 물성에 따라 각종 물질의 합성이 쉽고 그 방법 또한 다양하여, 그 활용에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한 기존의 나노 박막 합성 기술과 융합하면, 단순히 나노선의 합성에 머무르지 않고, 코어-셸 구조¹¹⁾ 혹은, 각종 물질로의 기능화¹²⁾를 시켜 기존 특성을 수십 - 수백 배 뛰어넘는 기능성 재료로 응용이 가능하다. 이러한 기술을 접목시켜 최근에는 코어-셸 발광 소자, Au, Pt, Pd 등을 기능화한 나노선 화학 센서 등이 연구되고 있으며 이러한 물질은 기존의 특성을 훨씬 뛰어넘는 특성을 나타내고 있다¹³⁻¹⁵⁾.

산화 비스무트(Bi_2O_3)는 α -, β -, γ -, 그리고 δ -의 다양한 결정학적 구조를 갖는 반도체 물질이다. 이러

*Corresponding Author : Wooseung Kang

Department of Metallurgical & Materials Engineering, Inha Technical College
E-mail : wkang651@inhac.ac.kr

한 결정성은 합성 혹은 열처리시의 온도에 따라 결정되는데, 이들 중 α - Bi_2O_3 는 p-형 반도체 특성을 갖고 있으며, β - Bi_2O_3 는 n-형 반도체 특성을 가진다¹⁶⁾. 이러한 특징들로 인하여 β - Bi_2O_3 는 각종 가스 센서, 광전지, 연료 전지를 비롯하여 광촉매와 광학 코팅제 등으로 널리 응용되고 있다¹⁷⁻¹⁹⁾. 특히 이러한 β - Bi_2O_3 를 나노선 구조로 합성하면, 극대화된 부피 대 표면적 비와 다른 구조에 비해 우수한 Debye length 등의 특징을 갖게 된다. 그리고 이러한 특징은 1차원 나노선이 각종 화학 가스등의 흡착을 용이하게 하며 이에 따라 전기적 특성 변화가 나타나는 현상으로 인하여 화합물 가스로의 이용에 매우 유리하게 된다. 따라서 최근에는 SnO_2 , ZnO , In_2O_3 등의 각종 나노선을 합성하여 가스 센서로 응용하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 코어-셸, 혹은 금속 기능화, 열처리 등의 각종 후처리를 통하여 그 검출 특성을 증진시키는 방법 또한 연구되고 있다²⁰⁻²²⁾.

β - Bi_2O_3 는 NO_2 gas 검출에 있어 우수한 특성을 나타내는 물질로 알려져 있다. 이 물질을 이용한 가스 센서의 제작에 있어 코어 셸 구조²³⁾ 그리고 산화중석과의 화합물 구조²⁴⁾ 등이 연구되었다. 일반적으로 산화물 반도체 나노선을 이용한 가스 검출 센서의 경우, 표면에 귀금속 나노입자를 코팅하면 스필오버효과라 불리는 촉매 특성에 의해 가스 검출 특성이 향상되는 결과를 나타낸다. 그러나 이 물질의 경우 아직 Pt 나노입자를 코팅한 정도만 보고 되었을 뿐²⁵⁾, 많은 연구가 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이 나노선 표면에 Pd 나노입자를 코팅하는 방법을 통해 가스 검출 특성의 향상을 측정하였다.

β - Bi_2O_3 나노선을 합성하는 방법에는 여러 가지가 있는데, MOCVD를 이용한 VLS 합성법을 비롯하여²⁶⁾, 열 산화법²⁷⁾, 수열 합성법²⁸⁾, 졸 겔법²⁹⁾ 등이 있다. Shen et. al 은 $\text{Bi}(\text{S}_2\text{CNEt}_2)_3$ 전구체로 사용하여 VLS 법으로 β - Bi_2O_3 나노선을 합성하였다³⁰⁾. 그러나 이러한 방법은 고가의 전구체를 사용하여야 하는 단점이 있고, 실리콘 기반의 마이크로 전자 소자와의 통합에 있어 어려움을 나타내고 있다. 본 연구에서는 Bi 분말을 사용하여 열 기화 법으로 나노선을 합성하는 연구를 진행하였다. 이러한 합성법을 이용하면 기존의 전구체를 사용하는 것보다 훨씬 쉽고 낮은 단가로 나노선의 합성이 가능할 뿐만 아니라, 다량의 고 순도 단결정의 합성이 가능하다. 또한, 이렇게 합성된 나노선을 기반으로 하여 NO_2 가스 검출 특성을 측정하였다. 더불어 상기 합성된 나노선에 Pd 입자를 기능화 하여 기존의 단순 합

성된 나노선에 비하여 NO_2 가스 검출 능력의 향상 정도를 측정하였다. 이러한 산화물 나노선을 이용한 가스 센서를 만들기 위해서는 나노선의 전자 이동도를 증진시키기 위하여 고온을 유지시켜야 하는데, 본 실험에서는 가스 검출을 위해 300°C 의 온도를 유지하였고, 이러한 고온에서 안정한 결정 특성을 유지하기 위해, 고온에서 안정한 β 상의 Bi_2O_3 를 사용하였다.

2. 실험방법

Pd 기능화된 β - Bi_2O_3 나노선의 합성을 위해서는 다음 2단계의 과정이 필요하다. 먼저, Bi 분말을 사용하여 Si 기판 위에 열 기화 법으로 β - Bi_2O_3 나노선을 합성 하였다. 이 나노선은 VLS 메커니즘으로 합성되었는데, 이러한 메커니즘을 사용하기 위하여 Si 기판 위에 3 nm 두께의 Au를 코팅하였다. Au를 코팅하기 위하여 Si 기판 위에 10 mA로 1분간 DC-sputtering을 수행하였다. 알루미늄이나 도가니에 1 g의 Bi 분말을 넣고 그 위 5 mm 위치에 Au 코팅된 Si 기판을 아래를 향하게 하여 도가니 위에 얹어 놓는다. 이후 알루미늄이나 도가니를 수평 관상로에 장입하고 1 mTorr로 진공을 잡는다. 그리고 시편이 장입된 로를 분당 10°C 의 온도로 650°C 가 될 때까지 승온시킨다. 이후 해당 온도까지 온도가 상승하면 100 sccm의 N_2 와 0.5 sccm의 O_2 가스를 주입하며 1 시간 동안 유지한다. 이 때, throttle valve를 이용하여 로 내부의 압력을 1 Torr로 유지시킨다. 이후, 주입하던 가스의 공급을 중단하고, 1 mTorr의 압력 하에서 시편을 로냉 시킨다. 로의 온도가 상온까지 냉각되면 로의 진공을 제거하고, 시편을 꺼내면 Au 코팅되었던 부분에 연녹색의 불투명한 막이 합성되어 있음을 확인할 수 있다. 이렇게 합성된 나노선의 표면에 Pd 나노 입자를 기능화하기 위하여 시편을 10 mmol PdCl_2 용액에 넣고 1.2 mW의 UV ($\lambda = 365 \text{ nm}$)를 30 분간 조사한다. 이후 시편을 꺼내어 흐르는 DI Water에 1분간 세척한 후 질소 건으로 건조한다. 이 시편을 진공로에 넣고 1 mTorr의 진공을 만든 후 500°C 의 온도로 1시간동안 열처리 한 후 상온으로 냉각한다. 시편을 꺼내면 기존의 연한 녹색에 약간 검붉은 색이 감도는 것을 확인할 수 있다. 합성된 나노선의 물성을 파악하기 위하여 다음의 분석법이 사용되었다. 먼저, 합성된 나노선의 형상을 파악하기 위하여 주사 전자 현미경(SEM, Hitachi S-4200SE)이 사용되었다. 그리고 합성된 나노선의 결정성을 파악하기 위하여 투과 전자 현미경(TEM, JEOL 2100F)을 사용하였다. 또

한, 합성된 나노선 박막의 결정학적 방향을 확인하기 위하여 0.5°의 glancing angle X선 회절 분석기 (XRD, Philips X'pert MRD Diffractometer)를 사용하였다.

합성된 나노선의 가스 검출 특성을 측정하기 위해서 다음과 같은 실험을 수행하였다. 먼저 SiO₂/Si 기판에 Interdigital Electrode(IDE) 패턴을 형성하였다. 이 패턴을 형성하기 위하여, 포토리소그래피 공정을 행하였고 evaporator를 사용해 Ni (10 nm 두께) 접착 층과 Au (50 nm 두께) 전극 층을 증착하였다. IDE 패턴의 전극과 전극 사이의 간격은 30 μm 가 되도록 형성하였다. 이후 합성된 나노선을 10 ml 의 2-propanol에 넣고 1분간 초음파 교반하여 나노선이 분산된 콜로이드 용액을 형성 하였다. 이렇게 만들어진 콜로이드 액을 마이크로 피펫을 사용하여 IDE 패턴이 형성된 기판에 한두 방울 떨어뜨린 후 건조하였다. 이후 나노선에 의하여 패턴과 패턴이 연결된 IDE 칩을 얻을 수 있었다. 이 칩의 가스 검출 특성을 파악하기 위하여, 칩을 관상로 안에 넣은 후, sourcemeter에 연결하였다. 이후 관상로를 300°C 까지 가열하여 검출 특성을 파악하였다. 가스 농도별 검출 특성을 파악하기 위하여 공기와 시료 가스가 연결된 가스 공급 시스템을 관상로에 연결하였고, 공급된 가스에 따른 저항의 변화를 측정하기 위하여 sourcemeter(Keithley sourcemeter-2612A)를 연결하였다. 또한 이러한 가스 공급의 제어와 저항의 측정을 위하여 해당 시스템을 PC에 연결하였다. 저항을 측정하기 위하여, 1 volt의 전압을 유지하였고, 0.5 초마다 저항을 측정하였다. Pd 나노입자 기능화된 β-Bi₂O₃ 나노선 센서의 가스에 대한 반응성은 R_g/R_a로 정의하였다. 여기에서 R_g는 특정 농도의 반응 가스가 주입될 때의 저항이고, R_a는 순수한 공기가 주입될 때의 저항이다. 모든 가스는 각각 200 sccm씩 주입되었으며, 관상로의 다른 한편은 외부와 연결되어 로 내부의 압력은 상압으로 유지되었다.

3. 결과 및 고찰

그림 1(a)는 단순 합성된 β-Bi₂O₃ 나노선 형상을 나타낸 주사 전자 현미경 사진이다. 이 사진에 의하면, 합성된 나노선의 두께는 약 100 - 200 nm 정도이며, 길이는 수 - 수십 μm임을 확인할 수 있었다. 합성된 나노선의 표면 상태는 매우 매끈한 형태임을 확인 가능하다. 한편, 그림 1(b)는 상기 나노선에 Pd 나노입자를 코팅한 후의 주사 전자 현미경 사진을 나타낸 것으로, 그림 1(a)의 단순 합성

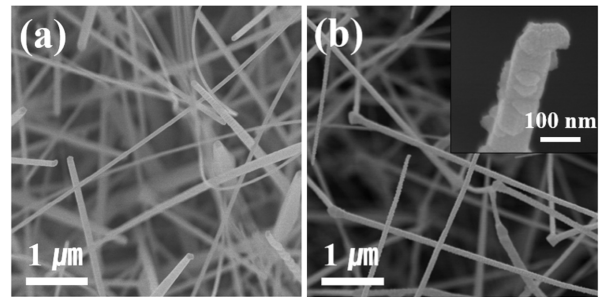


Fig. 1. (a) SEM image of β-Bi₂O₃ nanowires (b) SEM image of Pd-functionalized β-Bi₂O₃ nanowires. Inset is a magnified image of Pd-functionalized β-Bi₂O₃ nanowires.

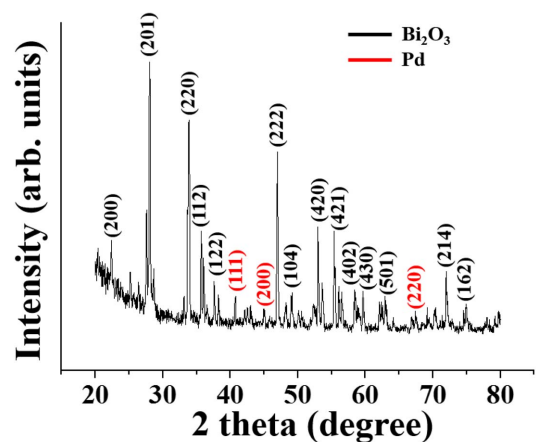


Fig. 2. XRD Patterns of Pd-functionalized β-Bi₂O₃ nanowires.

된 나노선에 비하여 표면에 울퉁불퉁한 형태로 입자가 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 이것은 조사된 자외선에 의해 PdCl₂ 용액에 담근 β-Bi₂O₃ 나노선 표면에 Pd 나노 입자가 응집되었기 때문이다.

그림 2는 β-Bi₂O₃ 나노선의 XRD 패턴을 분석한 사진이다. 그림 1(a)에서와 같이 합성된 나노선의 결정 방향을 확인할 수 있다. 이 분석을 위하여 X선은 0.5°의 glancing angle로 주사하였다. 그 결과 합성된 나노선이 (200), (201), (220), (112), (122), (222) 등의 회절 피크를 나타냄을 확인할 수 있었다. 반면 β-Bi₂O₃ 나노선 외에도, 표면에 코팅되어 있는 Pd 나노입자의 회절 또한 확인이 가능하였다. 그러나 나노선에 비하여 그 양이 매우 적기 때문에, 회절 패턴의 강도는 나노선에 비하여 매우 낮게 나타났다.

이 나노선으로 투과 전자 현미경 촬영을 수행하였는데, 이를 통하여 합성된 나노선의 결정 구조와, 코팅된 나노입자의 결정 구조를 파악하였다. 그림 3(a)는 나노선의 TEM 저배율 확대 사진을 나타낸 사진이다. 이 사진으로 합성된 나노선과 그에 코팅되어 있는 Pd 입자를 확인 하였으며, 이 입자의 크기가

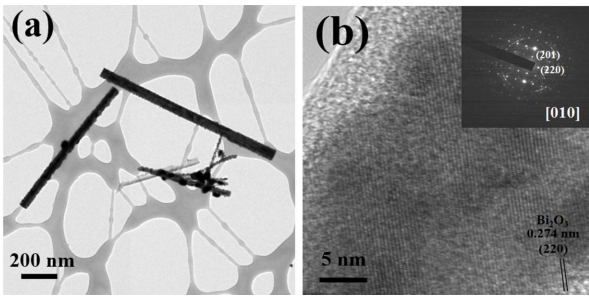


Fig. 3. (a) Low magnification TEM image of β - Bi_2O_3 nanowires. (b) High magnification TEM Image of β - Bi_2O_3 nanowires. Inset is SAED Patterns of Pd-functionalized β - Bi_2O_3 nanowires.

약 5 - 30 nm의 범위를 갖고 있음을 알 수 있었다. 그림 3(b)는 나노선의 TEM 고배율 확대 사진을 나타낸 것이다. 이 사진에서는 나노선과 나노입자의 격자 패턴을 확인할 수 있었는데, 이를 통하여 합성된 물질의 결정 형태와 결정 방향을 확인할 수 있었다. 합성된 나노선은 단결정으로 형성되었으며, 이 나노선의 표면에 코팅된 나노입자의 경우, 결정성을 나타내는 격자는 나타나 있으나, 단결정이 아닌 다결정으로 합성되었음을 알 수 있었다. 이 사진에 따르면 합성된 나노선의 인접하는 두 격자 면 간의 거리는 0.274 nm이며, 이 격자면의 지수는

(220)임을 나타낸다. 그림 3(b)의 상단에 삽입된 패턴의 경우 나노선 [010] 축의 제한시야 전자 빔 회절 분석법(SAED, Selected Area Electron Diffraction)을 나타낸 사진이다. 이 사진에는 각각의 규칙적인 패턴과 환상으로 이루어진 점들이 중첩되어 있는 것이 나타나는데, 이 규칙적인 강한 패턴으로 β - Bi_2O_3 나노선이 단결정으로 합성되었음을 확인할 수 있었으며, 환상의 회절 패턴을 통하여 기능화 된 입자들이 매우 다양한 방향으로 성장된 결정임을 확인할 가능하였다. 이는 나노입자가 다결정으로 이루어졌을 뿐만 아니라, 나노선 표면에 형성된 각 입자의 결정 방향이 모두 다르기 때문인 것으로 보인다.

그림 4는 단순 합성된 나노선과 이를 바탕으로 Pd를 코팅한 나노선의 NO_2 가스 검출 특성을 나타낸 그래프이다. 이 실험을 위하여, 300°C 의 온도를 유지하고 검출하고자 하는 특정한 농도의 NO_2 가스를 주입하였다. 가스의 농도는 50 ppb, 100 ppb, 500 ppb, 1 ppm, 2 ppm으로 공급하였으며, 주입된 가스의 농도는 합성 산소를 사용하여 제어하였다. 이 센서의 반응을 확인하기 위하여 5분 동안 NO_2 가스를 주입하였고, 10분 동안 합성 공기를 주입하여 회복을 하였다. 각각의 가스는 200 sccm의 주입 속도로 공급하였고, 공급된 가스는 체임버 끝의 배

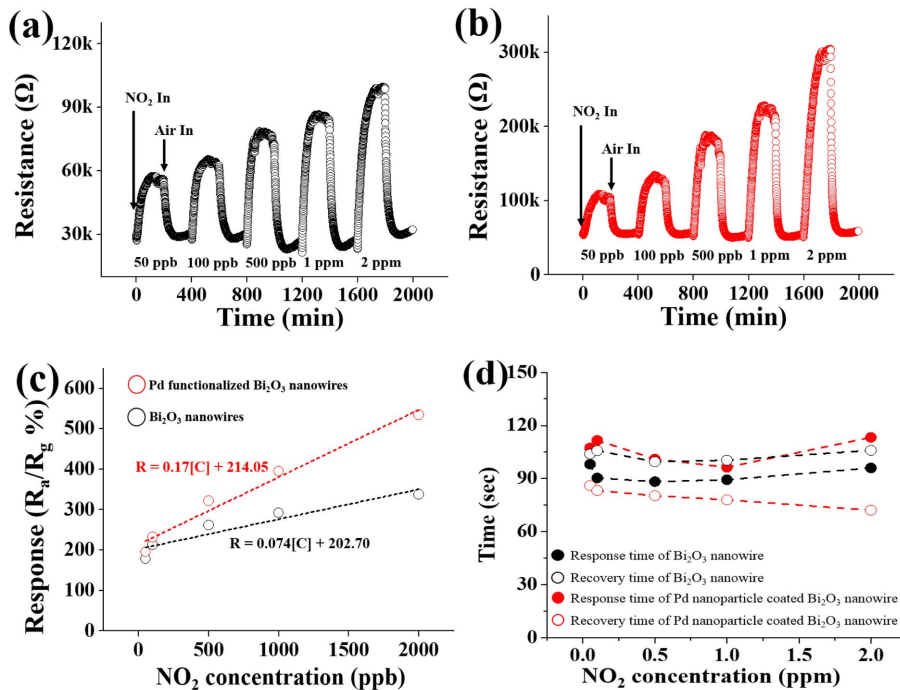
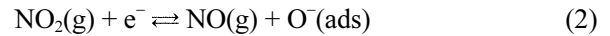
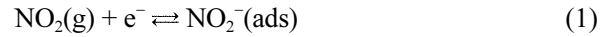


Fig. 4. (a) Dynamic responses of the β - Bi_2O_3 nanowires NO_2 gas sensors. (b) Dynamic responses of the Pd-functionalized β - Bi_2O_3 nanowires NO_2 gas sensors. (c) Responses of the β - Bi_2O_3 nanowires and Pd-functionalized β - Bi_2O_3 nanowires gas sensors as a function of the NO_2 gas concentrations. (d) Response and recovery time of β - Bi_2O_3 nanowires sensor and Pd-functionalized β - Bi_2O_3 nanowires sensor as a function of NO_2 concentrations.

기관을 통하여 외부로 배출되도록 하여 압력이 일정하게 유지되도록 하였다. 공급되는 가스는 특정 농도의 가스가 시편에 효율적으로 분사되도록, 1/4 인치 직경의 튜브를 통하여 시편 앞 0.5 cm 전면에 분사하도록 하였다. 실험이 진행되는 동안 IDE 칩은 sourcemeter와 연결하여 시간에 따른 저항의 변화를 측정하였다. 저항 값의 측정은 반응과 회복의 90% 지점에서 측정하였다. 또한, 반응성은 $R_g/R_a * 100$ (%) 로 계산하였다. 그림 4(a)는 단순 합성된 나노선의 농도에 따른 검출 특성을 나타낸 그래프이다. 공급된 가스의 농도가 50 ppb에서 2 ppm 으로 변화함에 따라서 나노선의 저항은 공기 중에 있을 때 보다 각각 178%, 213%, 261%, 292%, 338% 증가함을 알 수 있었다. 그림 4(b)는 이 나노선에 Pd를 코팅한 후 측정한 가스 검출 센서의 그래프이다. 이 그래프의 분석 결과, 그림 4(a)와 같은 농도의 가스를 공급하면 저항의 변화는 각각 196%, 232%, 322%, 395%, 535%로 나타났다. 따라서, 기능화한 금속의 유무에 따라 두 센서의 반응성은 1.09배 에서 1.58배 까지 증가함을 알 수 있었다. 그림 4(c)는 $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 나노선의 반응성을 바탕으로 나타낸 농도에 따른 반응성 그래프이다. 이를 통하여 공급되는 가스의 농도 변화에 따른 센서의 저항이 비교적 선형적으로 증가하였음을 확인할 수 있다. 이 그래프에 나타난 각 농도별 반응성 값을 선형 함수 그래프로 나타내었다. 함수는 $R = A[C]^n + B$ 로 나타내었으며, 각각 $R =$ 저항값, $A, B =$ 상수, $n =$ 지수, 그리고 $[C] =$ 반응 가스의 농도를 나타낸다. 이 함수를 구한 결과 단순 합성된 나노선의 경우 $R = 0.074[C] + 202.70$ 으로 계산되었고, Pd 기능화 된 나노선의 경우 $R = 0.17[C] + 214.05$ 로 계산되었다. 두 종류의 센서의 기울기 값인 A 를 비교하면 단순 합성된 나노선에 비하여 Pd 입자가 기능화 된 나노선의 경우 그 기울기가 2.30 배 더 큰 것을 알 수 있었다. 이는 NO_2 가스의 농도 증가에 따라 반응하는 센서의 민감도가 단순 합성된 나노선에 비하여 Pd를 기능화 한 나노선 센서가 그 만큼 더 높다는 것을 나타낸다. 그림 4(d)는 그림 4(a), (b)를 바탕으로 확인한 센서의 반응과 회복 속도를 나타낸 그래프이다. 반응과 회복 모두 100초 내외의 속도를 나타내었으나, Pd 나노입자를 코팅하였을 때 회복 속도가 다소 빨라진 것을 확인하였다. 이는 Pd의 스페일오버효과에 의한 회복 속도의 개선이라 추정할 수 있다.

$\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 나노선이 NO_2 가스를 검출하는 메커니즘은 다음과 같은 과정을 거치게 된다³¹⁾.



NO_2 가스가 공급되면 위의 두 반응이 나노선의 표면에서 일어나게 된다. 그리고 각각의 반응에 의해 $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 나노선의 표면에 존재하던 전자를 흡착하여 나노선 표면에 전자의 이탈에 의한 공핍층을 형성시킨다. 이러한 전자의 이탈에 의한 공핍층이 형성되는 이유는 $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 나노선이 n-형의 반도체 성질을 갖기 때문이며, 나노선의 캐리어가 전자로 이루어지기 때문이다. 이 결과 발생된 표면 공핍층으로 인하여 나노선의 저항은 증가하게 되며, 공급되는 가스의 농도가 더욱 높아질수록 위의 반응이 더욱 활발하게 이루어져 공핍층의 두께는 더욱 증가하게 된다. 따라서 농도가 증가함에 따라 나노선의 저항 역시 증가하게 된다. 반면 NO_2 가스의 공급을 중단하고, 공기를 주입하게 되면, 나노선 표면으로부터 전자를 흡착하던 가스 화학종들이 제거되고 따라서 공핍층이 감소하게 된다. 이러한 이유로 나노선의 저항이 다시 원상태로 낮아지는 회복 반응이 일어나게 된다.

한편, 이러한 나노선에 Pd를 기능화 하게 되면, 그 검출 반응이 훨씬 증대되게 된다. 그 이유로는 표면에 흡착된 Pd 입자가 촉매의 역할을 해서 나노선 표면에서의 스페일오버(spillover) 현상을 일으키기 때문이다³²⁾. 이 경우 Pd 입자가 코팅된 $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 나노선 표면에서는 NO_2 가스가 흡착과 탈착이 매우 민감하고 강하게 일어나게 된다. 따라서 같은 농도의 가스가 공급되었을 때 더욱 많은 양의 NO_2 가스가 나노선 표면에 흡착되게 되고 이로 인하여 더욱 민감한 반응성을 나타내게 되는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 VLS법을 통하여 $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 나노선을 합성하였다. 그리고 비교 목적으로 합성된 나노선에 PdCl_2 용액과 UV조사 공정을 이용하여 Pd 나노입자를 코팅하였다. 이렇게 준비된 재료를 바탕으로 NO_2 가스센서를 제작하여 Pd 나노입자가 코팅된 경우 어느 정도의 검출 특성의 향상이 나타났는지에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 기존의 단순 나노선이었을 때 보다 Pd 나노 입자가 코팅된 $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 나노선인 경우 0.05-2ppm NO_2 가스 농도범위에서 약 1.58배의 반응성과 2.3배 정도의 민감도가 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 센서 표면에 코팅된 나노입자의 촉매 작용으로 인하여 스페일오버(Spillover) 효과가 나타나기 때문으로 판단된다.

References

1. J. Guo, J. Zhang, M. Zhu, D. Ju, H. Xu, B. Cao, *Sens. Actuators B* 199 (2014) 339.
2. S. K. Kim, K. D. Song, T. J. Kempa, R. W. Day, C.M. Lieber, H. G. Park, *ACS Nano* 8 (2014) 3707.
3. F. Qian, H. Wang, Y. Ling, G. Wang, M.P. Thelen, Y. Li, *Nano Lett.* 14 (2014) 3688.
4. D. Meng, T. Yamazaki, T. Kikuta, *Sens. Actuators B* 190 (2014) 838.
5. N. D. Chinh, N. V. Toan, V. V. Quang, N. V. Duy, N.D. Hoa, N.V. Hieu, *Sens. Actuators B* 201 (2014) 7.
6. E. N. Dattoli, A. V. Davydov, K. D. Benkstein, *Nanoscale* 4 (2012) 1760.
7. L. Liao, Y. C. Lin, M. Bao, R. Cheng, J. Bai, Y. Liu, Y. Qu, K. L. Wang, Y. Huang, X. Duan, *Nature* 467 (2010) 305.
8. M. M. Shulaker, G. Hills, N. Patil, H. Wei, H. Y. Chen, H.-S. P. Wong, S. Mitra, *Nature* 501 (2013) 526.
9. T. Kato, R. Hatakeyama, *Nature Nanotechnol.* 7 (2012) 651.
10. S. V. Aert, K. J. Batenburg, M. D. Rossell, R. Erni, G. V. Tendeloo, *Nature*, 470 (2011) 374.
11. J. Tang, Z. Huo, S. Brittman, H. Gao, P. Yang, *Nature Nanotechnol.* 6 (2011) 568.
12. G. Y. Chai, O. Lupan, E. V. Rusu, G. I. Stratan, V. V. Ursaki, V. Sontea, H. Khallai, L. Chow, *Sens. Actuators A* 176 (2012) 64.
13. N. Singh, R. K. Gupta, P. S. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 3 (2011) 2246.
14. M. W. G. Hoffmann, J. D. Prades, L. Mayrhofer, F. H. Ramires, T. T. Jarvi, M. Moseler, A. Waag, H. Shen, *Adv. Func. Mater.* 24 (2014) 595.
15. I. S. Hwang, J. K. Choi, H. S. Woo, S. J. Kim, S. Y. Jung, T. Y. Seong, I. D. Kim, J. H. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 3 (2011) 3140.
16. S. K. Blower, C. Greaves, *Acta Cryst. C*44 (1988) 587.
17. L. Li, Y. W. Yang, G. H. Li, L. D. Zhang, *Small* 2 (2006) 548.
18. X. Xia, J. Tu, Y. Zhang, X. Wang, C. Gu, X.B. Zhao, H.J. Fan, *ACS Nano* 6 (2012) 5531.
19. M. Muruganandham, R. Amutha, G. J. Lee, S. H. Hsieh, J. J. Wu, M. Sillanpaa, *J. Phys. Chem. C* 116 (2012) 12906.
20. L. Liao, H. X. Mai, Q. Yuan, H. B. Lu, J. C. Li, C. Liu, C. H. Yan, Z. X. Shen, T. Yu, *J. Phys. Chem. C* 112 (2008) 9061.
21. Q. Wan, T. H. Wang, *Chem. Commun.* 1 (2005) 3841.
22. A. Kolmakov, D. O. Klenov, Y. Lilach, S. Stemmer, M. Moskovits, *Nano Lett.* 5 (2005) 667.
23. S. Park, S. An, H. Ko, C. Jin, C. Lee, *Bull. Korean Chem. Soc.* 33 (2012) 3368.
24. L. Wu, J. Xia, J. Wu, Q. Li, *Ionics* 21 (2015) 3239.
25. S. Park, S. An, H. Ko, C. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 15 (2015) 1605.
26. C. Bedoya, G. G. Condorelli, G. Anatasi, A. Baeri, F. Scerra, I.L. Fragala, J.G. Lisoni, D. Wouters, *Chem. Mater.* 16 (2004) 3176.
27. S. Park, S. An, H. Ko, C. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 14 (2014) 1.
28. M. Ge, Y. Li, L. Liu, Z. Zhou, W. Chen, *J. Phys. Chem. C* 115 (2011) 5220.
29. L. Armelao, P. Colombo, M. Fabrizio, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 13 (1998) 213.
30. G. Shen, P. Chen, K. Ryu, C. Zhou, *J. Mater. Chem.* 19 (2009) 828.
31. X. Gou, R. Li, G. Wang, Z. Chen, D. Wexler, *Nanotechnol.* 20 (2009) 495501.
32. R. K. Joshi, Q. Ju, F. Alvi, N. Joshi, A. Kumar, *J. Phys. Chem. C* 113 (2009) 16199.