



백금 담지 다공성 산화인듐 나노입자 구조를 이용한 수소센서

윤성도^{a,b}, 명윤^a, 나찬웅^{a,*}

^a한국생산기술연구원 동남본부, ^b고려대학교 신소재공학과

Hydrogen sensor using Pt-loaded porous In₂O₃ nanoparticle structures

Sung Do Yun^{a,b}, Yoon Myung^a, Chan Woong Na^{a,*}

^aDongnam Division, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 46938, Korea

^bDepartment of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received 28 November, 2023 ; revised 18 December, 2023 ; accepted 19 December, 2023)

Abstract

We prepared a highly sensitive hydrogen (H₂) sensor based on Indium oxides (In₂O₃) porous nanoparticles (NPs) loaded with Platinum (Pt) nanoparticle in the range of 1.6~5.7 at.%. In₂O₃ NPs were fabricated by microwave irradiation method, and decorations of Pt nanoparticles were performed by electroless plating on In₂O₃ NPs. Crystal structures, morphologies, and chemical information on Pt-loaded In₂O₃ NPs were characterized by grazing-incident X-ray diffraction, field-emission scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, respectively. The effect of the Pt nanoparticles on the H₂-sensing performance of In₂O₃ NPs was investigated over a low concentration range of 5 ppm of H₂ at 150–300 °C working temperatures. The results showed that the H₂ response greatly increased with decreasing sensing temperature. The H₂ response of Pt loaded porous In₂O₃ NPs is higher than that of pristine In₂O₃ NPs. H₂ gas selectivity and high sensitivity was explained by the extension of the electron depletion layer and catalytic effect. Pt loaded porous In₂O₃ NPs sensor can be a robust manner for achieving enhanced gas selectivity and sensitivity for the detection of H₂.

Keywords : Gas sensor; Hydrogen; fast recovery; In₂O₃; microwave irradiation method; Platinum.

1. 서 론

최근 화석연료의 대체 에너지로 각광받는 수소에너지 분야는 수소생산, 연료전지, 수소저장, 수소 검지 등 다양한 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다 [1-4]. 수소 가스는 무미, 무색, 무취로 사람이 쉽게 감지할 수 없으며 점화 에너지 (0.017 mJ)가 낮고 가연성 범위가 넓어 4-75% 사이의 범위에서 산소 존재 시 폭발이 발생할 수 있는 위험한 가스로 공

기 중 누출되었을 경우 심각한 피해를 초래한다. 따라서, 수소의 생산, 저장 및 사용 과정에서 신속하고 정확한 수소 진단 모니터링이 필요하며 전주기적인 수소에너지분야에 수소 농도 모니터링/제어에도 필수적이다. 가스크로마토그래프, 질량분석기 등의 전통적인 수소검출기는 크기가 크고, 비용이 많이 들고 분석 속도가 느리며, 때로는 사용 온도가 높아 안전상의 위험이 발생할 수 있어, 휴대용, 현장 모니터링 등 광범위하게 사용하기 위해서는 크기가 더 작고, 생산비용과 전력소모가 낮으며, 운전온도가 더 낮고, 반응속도가 더 빨라지는 수소가스센서가 필요하며, 수소경제의 급속한 발전으로 보다 신속하

*Corresponding Author : Chan Woong Na
Korea Institute of Materials Science
Tel: +82-51-987-9203 ; Fax: +82-51-987-9214
E-mail: cwna@kitech.re.kr

고 정확한 수소감지, 마이크로 전자집적회로와의 호환성 등을 갖춘 새로운 형태의 수소가스센서에 대한 연구가 요구되고 있다. 현재 상용화된 수소 센서는 전기 화학, 반도체, 열전, 금속, 광학 및 음향 센서 등 많은 유형이 있다. 그 중 반도체식 산화물 가스센서는 간단하고, 대량생산이 용이하고 가격경쟁력이 우수한 센서로 SnO₂, ZnO, In₂O₃, TiO₂, WO₃ 등을 감지체로 에탄올, 수소, 황화수소, 암모니아, 휘발성 유기화합물 등을 검지하는데 주로 사용되고 있다 [5-9]. 비록, 산화물 반도체 가스센서가 낮은 선택성에 대한 문제와 여전히 높은 작동 온도로 인해 높은 전력 소비 및 잠재적인 안전 위험 가능성을 가지고 있지만 촉매 코팅, p-n 접합, 작동온도의 변화, 필터링 레이어, 나노구조의 변화를 통해서 극복되고 있다 [10]. Kumar *et al.*은 150도의 온도에서 Pt가 코팅된 ZnO를 이용하여 100 ppm에서 검지가 가능한 것으로 보고하였다 [11]. 그러나 상대적으로 낮은 가스감도 $63.8\%((R_a - R_g)/R_a \times 100\%, S=1.6)$ 를 보고하였다. Zhang *et al.*은 TiO₂-NiO thick film을 이용하여 실온에서 100-1000 ppm 범위에서 수소를 검지하는 논문을 보고하였으나 100 ppm 이하의 저농도 수소에 대한 연구는 보고되지 않았다 [12]. Cai *et al.*은 Pd-decorated Fe₂O₃-embedded NiO nanofibers를 감지체로 200 °C에서 고농도의 1000 ppm의 수소에 대해 199배의 높은 가스 감응 특성 연구를 보고하였다 [13]. 최신 연구 동향도 TiO₂, NiO, ZnO 등의 금속산화물 구조에 p-type NiO나 Pt, Pd 등의 귀금속 촉매를 코팅하여 수소를 검지하는 연구가 보고되어 있지만 대부분 100 ppm 이상의 고농도에서 수소를 검지하는 연구가 주를 이루고 있어 수소 누출에 대한 선제적 대응을 위해서 100 ppm 보다 낮은 농도에서의 가스 감응 특성 연구에 대한 필요성이 요구되어진다 [14-16]. 금속산화물 가스센서에서 높은 가스 감응특성을 달성하기 위해서는 응집이 적은 나노구조와 가스 투과성이 우수한 구조가 필요하다 [6]. 가스 투과성이 우수한 중공구조, 나황구조, 계층구조의 금속산화물 소재는 수열합성, 분무열분해, 기상화학증착법등을 이용하여 합성되고 있지만 합성 시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있다. 그에 반해 마이크로파를 이용한 다공성 산화물 나노입자의 합성은 위의 합성법과 비교하여 공정수가 적고 고에너지 조사를 통한 2분 내외의 짧은 합성시간으로 응집이 적은 가스 투과성이 우수한 다공성 나노구조를 만들 수 있다 [17]. 본 연구에서는 마이크로파를 이용하여 다공성 In₂O₃ 나

노입자를 합성하고 수소에 대한 선택을 갖기 위해서 무전해도금을 이용하여 In₂O₃ 표면에 Pt 나노입자를 담지하였다.

2. 실험 방법

2.1 다공성 In₂O₃ 나노입자의 합성

Porous In₂O₃ NPs는 마이크로파 합성법을 이용하여 제조하였다. 0.1 g Indium(III) nitrate hydrate (In(NO₃)₃·xH₂O, 99.99%, Alfa aesar)와 0.2 ml 증류수, 3.33 ml Glycerol (99.0% SAMCHUN), 16.67 ml Isopropyl alcohol (99.5%, J.T.Baker)를 비커에 넣고 마그네틱 바를 20분 동안 교반하여 전구체 용액을 제작하였다. 제작된 전구체 용액을 테프론 압력 용기에 넣고 1000 W의 마이크로파를 60 초 동안 노출시켜 반응을 진행하고, 반응이 끝난 후 원심분리기를 이용하여 에탄올과 증류수로 5회 세척하였다. 수급된 파우더는 40 °C 오븐에서 6시간 건조를 진행한 후 600 °C에서 2 시간 (10 °C / 분)동안 산화분위기 열처리를 통해 구형의 Porous In₂O₃ 나노입자를 얻었다.

2.2 무전해도금을 이용한 Pt 코팅

준비된 100 mg 다공성 In₂O₃ NPs와 Ethyl alcohol (99.5% Sigma Aldrich), 50ml 증류수와 함께 비커에 넣고 초음파 분산을 10 분 진행하였다. 다공성 In₂O₃ 나노입자가 분산된 용액에 5 mg, 10 mg, 15 mg K₂PtCl₆ (99.99% Sigma Aldrich)을 넣고 마그네틱 바를 이용하여 교반 후 85 °C 물에 비커를 넣고 초음파 분산을 5분 진행하였다. 반응이 끝난 후 원심분리기를 이용하여 에탄올과 증류수로 5회 세척하여 분말을 수득하였다. 세척된 분말은 60 °C 오븐에서 6시간 동안 건조를 실시하여 1.6 at% Pt-loaded In₂O₃, 3.8 at% Pt-loaded In₂O₃, 그리고 5.7 at% Pt-loaded In₂O₃ 나노입자를 얻을 수 있었다.

2.3 수소센서 제작

4개 20 ml vial에 각각 5 ml α -terpineol (90% technical grade, Sigma-Aldrich)와 0.25 g Ethyl cellulose (ETHOCEL™ Standard 4 Premium)를 넣고 2 g의 Porous In₂O₃ NPs, 2 g 1.6 at% Pt-

loaded In_2O_3 , 2 g의 3.8 at% Pt-loaded In_2O_3 , 그리고 2 g의 5.7 at% Pt-loaded In_2O_3 NPs 분말을 넣고 5분 동안 초음파 분산 한 후 60 °C에서 4시간 동안 마그네틱 바를 이용하여 교반하였다. 분산된 4개의 페이스트는 20 μm 두께의 고분자 마스크를 이용하여 SiO_2 1 μm / 50 nm Ti / 100 nm Pt 전극이 10 μm 간격으로 패터닝된 실리콘 기판 (8 × 8 mm)에 스크린 프린터를 이용하여 전극에 프린팅하였고, 센서 측정 모듈에 연결하여 튜브형 고온로에서 가스 감응 특성 연구를 진행하였다.

2.4 특성 평가

In_2O_3 와 1.6 at% Pt-loaded In_2O_3 , 3.8 at% Pt-loaded In_2O_3 , 그리고 5.7 at% Pt-loaded In_2O_3 시료 상은 X-선 회절분석기(XRD, LabX XRD-6100, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석되었고, In_2O_3 와 Pt 담지 In_2O_3 형상은 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, SU-5000, Hitachi Co, Ltd., Japan), 전자투과현미경 (TEM, Tecnai G2 F20 X-Twin), Energy Dispersive Spectrometer (Energy Dispersive X-ray microanalysis)을 통해 관찰되었다.

2.5 가스 측정

준비된 센서의 수소 감응 특성은 가스 공급 시스템과 연결된 튜브형 고온로에서 평가되었다. 튜브

형 고온로 내부 분위기는 가스 공급 시스템에 설치된 MFC(Mass Flow Controllers)를 이용하여 dry air (99.999%, 한국 특수 가스)와 수소 가스(5 ppm in synthetic air, 한국 특수 가스)를 흘려주어 제어했다. 이 때 유속은 500 mL min⁻¹으로 고정되었고, 모든 측정은 150 ~300 °C 사이에서 이루어졌다(17 ± 3 °C). 가스 흐름 변화에 따른 센서 저항의 변화는 picoammeter (6487, Keithley Co., Ltd., USA)를 통해서 측정하였다. 이 때 인가 전압은 1 V로 고정되었다. 가스 감도(S)는 R_g/R_a 로 계산했는데, R_g 와 R_a 는 각각 수소 가스와 dry air에서의 센서 저항을 의미한다. 반응 시간과 회복 시간은 분석 가스 또는 dry air에 노출되었을 때 발생한 센서의 최종적인 저항 변화의 90%에 도달했을 때까지 걸린 시간으로 정의한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Pt 담지 다공성 In_2O_3 나노입자의 분석

Fig.1은 마이크로파합성법으로 제작된 3.8 at% Pt- In_2O_3 나노입자의 FE-SEM, TEM, EDS 맵핑 이미지이다. Pt 담지 In_2O_3 의 크기는 ~50 nm이고 다공성 구조인 것을 TEM 이미지를 통해서 확인할 수 있다. 고배율 TEM 이미지에서 In_2O_3 는 cubic 구조(JCPDS #06-0416, $a = 10.11 \text{ \AA}$)의 (440) 면이 확인되었고, 면간 거리는 0.179 nm 이다. Pt 나노입자의 크기가 수 나노미터로 작아서 이미지에서는 관찰할 수는 없었지만 EDS 맵핑 이미지에서 In_2O_3 표

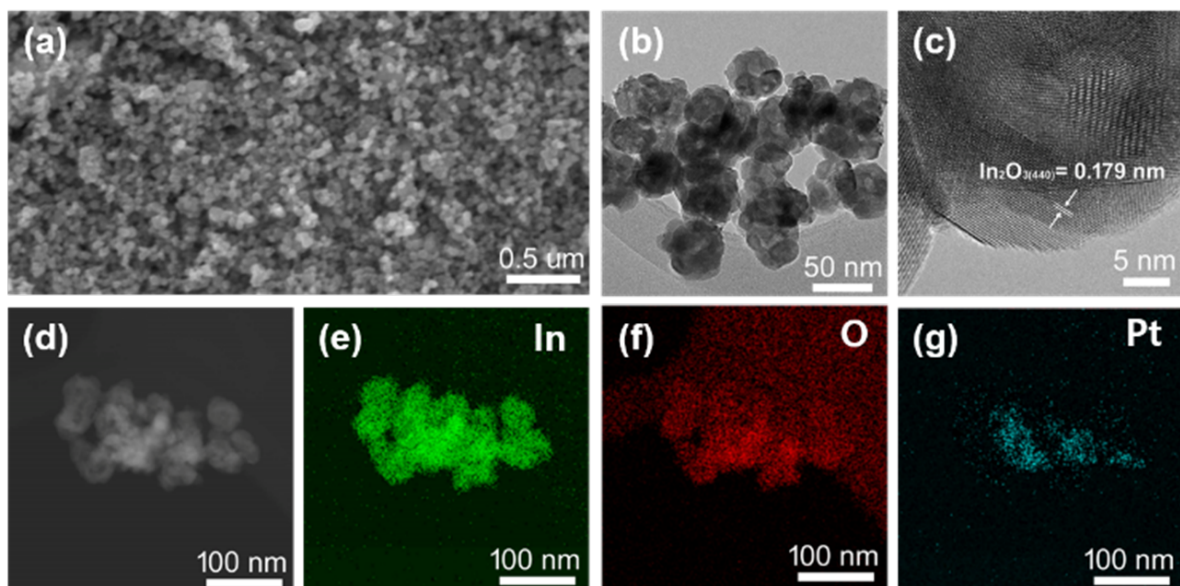


Fig. 1. Morphology and crystal structures of the Pt-loaded In_2O_3 NPs: (a) SEM image of Pt-loaded In_2O_3 NPs; (b) and (c) TEM images of Pt-loaded In_2O_3 NPs; (d), (e), (f), and (g) TEM image of Pt-loaded In_2O_3 NPs and EDS elemental mapping of In, O, and Pt.

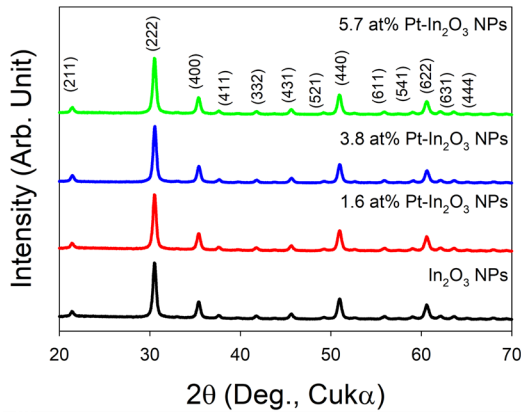


Fig. 2. XRD patterns of (a) pure In_2O_3 NPs, (b) 1.6at% Pt-loaded In_2O_3 NPs, (c) 3.8at% Pt-loaded In_2O_3 NPs, and (d) 5.7 at% Pt-loaded In_2O_3 NPs.

표면에 Pt 나노입자가 균일하게 코팅된 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 2는 순수한 In_2O_3 나노입자, 1.6at% Pt-loaded In_2O_3 나노입자, 3.8at% Pt-loaded In_2O_3 나노입자, 그리고 5.7 at% Pt-loaded In_2O_3 나노입자의 XRD 패턴으로, 상기 합성법을 통해 cubic 구조의 순수한 In_2O_3 (JCPDS #06-0416, $a = 10.11 \text{ \AA}$)인 것을 확인할 수 있었고, 모든 시료에서 Pt 피크는 관찰되지 않았으며, 전 영역에서 In_2O_3 외의 피크는 관찰되지 않았다. 이는 Pt의 함량이 작아서 XRD에서는 관찰되지 않는 것으로 보인다.

3.2 Pt 담지 다공성 In_2O_3 나노입자의 수소 감응 특성

마이크로파 합성법 및 무전해도금을 이용한 순수

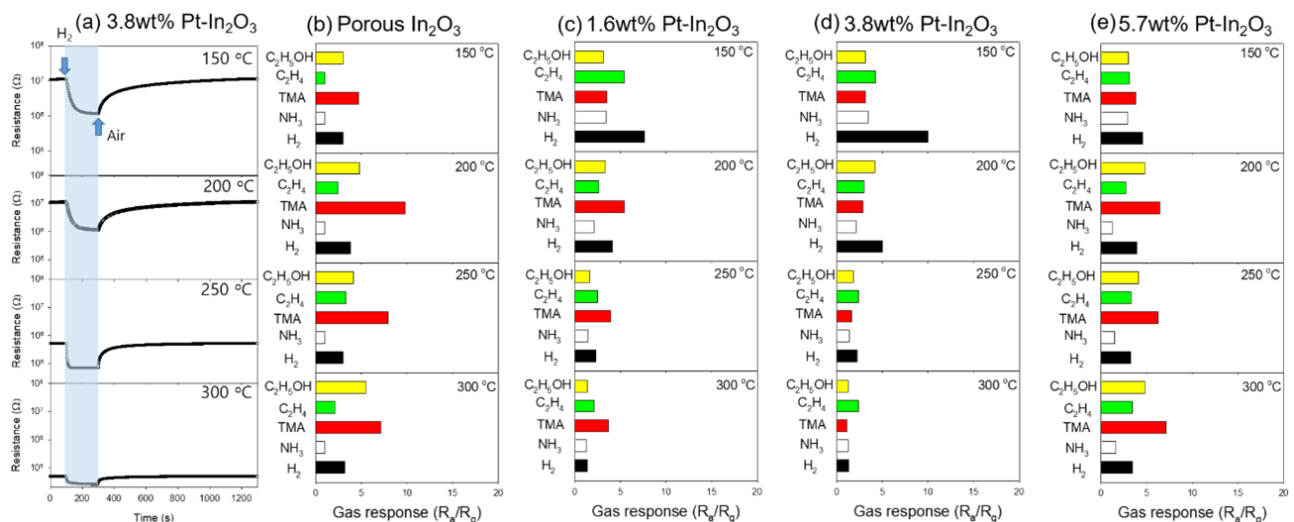
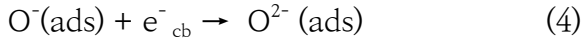
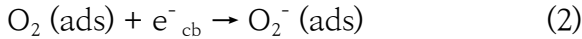


Fig. 3. (a) Gas responses (R_a/R_g , R_a : resistance in air and R_g : resistance in gas) of Pt-loaded In_2O_3 sensor to 5 ppm H_2 at 150–300 °C, (b) gas responses to $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, C_2H_4 , Trimethylamine (TMA), NH_3 , and H_2 , over the temperature range of 150 to 300 °C: (b) gas responses of pure porous In_2O_3 sensor (c) 1.6at% Pt- loaded In_2O_3 NPs, (d) 3.8at% Pt- loaded In_2O_3 NPs, and (e) 5.7 at% Pt- loaded In_2O_3 NPs.

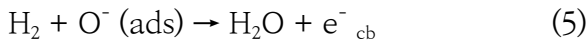
한 In_2O_3 NPs 와 Pt- loaded In_2O_3 NPs 센서의 수소 감응 특성을 평가하였다. Fig.3의 (a)는 5 ppm의 수소를 챔버에 흘려주었을 때 150 ~ 300 °C 사이의 온도에서 센서의 저항변화와 가스 감도(S), 그리고 dry air 에서의 센서 저항(R_a)이다. 3.8at% Pt-loaded In_2O_3 NPs 센서는 150 °C에서 수소 가스에 노출되었을 때 약 10배의 가스 감도를 보여주었다. 150 °C 이하의 온도에서 5 ppm 수소에 대해 더 높은 가스 감응 특성을 보여주지만 반응 후 dry air를 흘려주었을 때 충분히 회복이 되지 않았고, 회복속도 또한, 늦는 것을 확인할 수 있었다. (본 연구에서는 보여주지 않음) 순수한 In_2O_3 센서의 경우, 모든 영역의 온도에서 가스의 선택성을 확인할 수 없었다. (Fig.3(d)) 3.8 at% Pt-loaded In_2O_3 NPs 센서는 150도에서만 수소의 감도가 비약적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 In_2O_3 표면에 존재하는 Pt 입자가 H_2 분자와 상호작용하여 수소가 자유 라디칼 수소로 변환되어 흡착 산소와 수소 간의 반응이 낮은 작동 온도에서 활성화 될 수 있도록 하여 높은 가스 감응 특성을 보여주는 것으로 판단된다.

3.3 수소 감응 메커니즘

In_2O_3 의 가스 감지 메커니즘은 다음과 유사하게 설명될 수 있다. 전형적인 n-type 산화물 반도체에서, 전자가 정공보다 농도가 커서 major 캐리어가 된다. 공기 중 산소는 산화물 표면과 상호작용하여 표면에 흡착된다. 산화물 표면에 산소와 전자가 반응할 때 산소 분자는 O_2^- , O^- , 그리고 O^{2-} 와 같이 변환된다.



여기서 $\text{O}_2(\text{g})$ 및 $\text{O}_2(\text{ads})$ 는 기체 및 흡착된 산소를 나타낸다. e^-_{cb} 는 컨덕션 밴드에 포획된 전자를 의미한다. 각각의 분자는 100 °C 이하에서 O^{2-} 종은 100 ~ 250 °C의 온도 범위에서 O^- 종이 형성되고 250°C 이상의 온도에서는 O^{2-} 종이 생성된다. 음으로 대전된 산소와 산화물표면 사이에서는 전자공핍층이 형성된다 [18]. H_2 와 같은 환원성 가스가 산화물 표면에서 반응할 때, 환원성 가스는 아래와 같이 흡착된 산소종과 반응한다:



반응한 가스는 센서의 대기로 방출되는 반면 포획된 전자는 다시 전자의 전도대역으로 방출된다. Pt 나노입자가 존재하는 경우 In_2O_3 표면은 전자 감응 및 촉매 활성을 제공을 통해서 스페셜오버 효과를 통해서 가스 감지 특성을 향상시킨다 [19]. Pt 나노입자가 In_2O_3 에 담지되면 Pt (5.6 eV)와 In_2O_3 (4.3-4.5 eV)의 일함수의 차이로 인해 전자가 In_2O_3 에서 Pt로 이동이 일어나고 접합에서는 열역학적 안정성을 달성하기 위해 페르미 레벨이 재배열 된다. 또한, Pt와 In_2O_3 의 계면에 추가적인 전자공핍층이 형성되고 공기 중에 존재하는 산소는 Pt와 반응하여 산소 분자에 전자를 공급한다. 또한, In_2O_3 의 컨덕션 밴드에서 Pt로 더 많은 전자가 전달된다. Pt는 스페셜오버 효과에서 의해서 공기 중에 있는 산소와 상호 작용하고 다음과 같이 분자를 이온성 산소종으로 확산시킨다:



이 산소종들은 In_2O_3 표면으로 이동하고 H_2 와 반응할 수 있는 흡착된 산소의 활성 부위의 양이 증가하여 Pt-loaded In_2O_3 의 감도가 향상된다. 그와 함께, H_2 가스가 Pt-loaded In_2O_3 표면에서 반응할 때, Pt 나노입자는 H_2 분자와 상호작용하여 수소가 자유 라디칼 수소로 변환되어 흡착 산소와 수소 간의 반응을 낮은 작동 온도에서 활성

할 될 수 있도록 한다. 따라서, Pt-loaded In_2O_3 가 낮은 온도에서 수소에 대한 감도가 크게 향상되는 것을 설명할 수 있다. 또한, 3.8 at% Pt-loaded In_2O_3 에서 수소에 대한 가스 감응 특성이 가장 우수한 이유는 Pt 양이 적을 경우는 촉매의 효과가 낮아서 감지 성능이 낮은 것이고 Pt의 양이 너무 많을 경우 Pt 나노입자 사이의 응집이 작용하여 Pt 나노입자와 In_2O_3 가 균일한 흡착이 이루어지지 않아 Pt의 촉매 특성이 감소하게 된다. 이와 더불어, Pt 나노입자의 과도한 증착은 In_2O_3 표면의 가스 감지영역의 감소를 유발하고 이는 In_2O_3 표면에 흡착된 음으로 대전된 산소수가 감소되는 것으로 귀결되어 5.7 at% Pt-loaded In_2O_3 센서에서 수소 가스 감응 특성이 낮아진다. 따라서, Pt 나노입자가 균일하게 In_2O_3 표면에 분산되어 있는 3.8 at% Pt load In_2O_3 NPS가 수소 감응 특성이 우수한 가스 감응특성을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 간단한 마이크로파 합성법 및 무전해도금 이용하여 Pt 담지 다공성 In_2O_3 센서를 제작하고 그들의 수소 감응 특성을 평가했다. 특히, 3.8at% Pt-loaded In_2O_3 NPs 센서는 150도에서 5 ppm의 수소에 대해 방해가스 대비 높은 가스 감응 특성을 나타냈다. 이는 다공성 In_2O_3 나노입자 표면에 담지된 Pt 나노입자와 수소의 반응이 효율적으로 일어났기 때문으로 판단된다. 따라서, 본 연구결과는 향후 저농도 수소 검출용 고성능 센서 제작에 널리 활용되어 전주기적인 수소 에너지 분야에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgment

본 성과물은(논문, 산업재산권, 품종보호권 등)은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ016994)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- [1] F. Dawood, M. Anda, G.M. Shafiullah, Hydrogen production for energy: An overview, International Journal of Hydrogen Energy, 45 (2020) 3847-3869.
- [2] G. Bayrak, Wavelet transform-based

- fault detection method for hydrogen energy-based distributed generators, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (2018) 20293–20308.
- [3] F. Zhang, P. Zhao, M. Niu, J. Maddy, The survey of key technologies in hydrogen energy storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (2016) 14535–14552.
- [4] P.E. Dodds, I. Staffell, A.D. Hawkes, F. Li, P. Grünwald, W. McDowall, P. Ekins, Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (2015) 2065–2083.
- [5] H. Gu, Z. Wang, and Y. Hu, Hydrogen gas sensors based on semiconductor oxide nanostructures, *Sensors*, 12 (2012) 5517–5550.
- [6] J.H. Lee, Gas sensors using hierarchical and hollow oxide nanostructures: Overview, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 140 (2009) 319–336.
- [7] K. P. Kamloth, Semiconductor junction gas sensors. *Chemical Review*, 108 (2008) 367–399.
- [8] N. Barsan, D. Koziej, U. Weimar, Metal oxide-based gas sensor research: How to? *Sensors and Actuators B: Chemical*, 121 (2007) 18–35.
- [9] C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang, R. Gao, Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors, *Sensors*, 10 (2010) 2088–2106.
- [10] Z. Dai, T. Liang, J.H. Lee, Gas sensors using ordered macroporous oxide nanostructures, *Nanoscale Advances*, 1 (2019) 1626–1639.
- [11] S. Kumar, S.D. Lawaniya, S. Agarwal, Y.T. Yu, S.R. Nelamarri, M. Kumar, Y.K. Mishra, K. Awasthi, Optimization of Pt nanoparticles loading in ZnO for highly selective and stable hydrogen gas sensor at reduced working temperature, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 375 (2023) 132943.
- [12] H. Zhang, W. Wei, T. Tao, X. Li, X. Xia, Y. Bao, M. Lourenço, K. Homewood, Z. Huang, Y. Gao, Hierarchical NiO/TiO₂ heterojunction-based conductometric hydrogen sensor with anti-CO-interference, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 380 (2023) 133321.
- [13] Z. Cai, J. Park, S. Park, Synergistic effect of Pd and Fe₂O₃ nanoparticles embedded in porous NiO nanofibers on hydrogen gas detection: Fabrication, characterization, and sensing mechanism exploration, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 388 (2023) 133836.
- [14] N. Tamaekong, C. Liewhiran, A. Wisitsoraat, S. Phanichphant, Sensing characteristics of flame-spray-made Pt/ZnO thick films as H₂ gas sensor, *Sensors*, 9 (2009) 6652–6669.
- [15] Q.A. Drmosh, Z.H. Yamani, Hydrogen sensing properties of sputtered ZnO films decorated with Pt nanoparticles, *Ceramic International*, 42 (2016) 12378–12384.
- [16] O. Lupan, V. Postica, N. Wolff, J. Su, F. Labat, I. Ciofini, H. Cavers, R. Adelung, O. Polonskyi, F. Faupel, L. Kienle, B. Viana, T. Pauport'e, Low-temperature solution synthesis of Au-modified ZnO nanowires for highly efficient hydrogen nanosensors, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11 (2019) 32115–32126.
- [17] A. Mirzaei, G. Neri, Microwave-assisted synthesis of metal oxide nanostructures for gas sensing application: A review, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 237 (2016) 749–775.
- [18] S. Agarwal, P. Rai, E.N. Gatell, E. Llobet, F. Gell, M. Kumar, K. Awasthi, Gas sensing properties of ZnO nanostructures (flowers/rods) synthesized by hydrothermal method, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 292

- (2019) 24–31.
- [19] L. Giancaterini, C. Cantalini, M. Cittadini, M. Sturaro, M. Guglielmi, A. Martucci, A. Resmini, U. Anselmi-Tamburini, Au and Pt nanoparticles effects on the optical and electrical gas sensing properties of sol-gel-based ZnO thin-film sensors, *IEEE Sensors Journal*, 15 (2015) 1068–1076.