

## 높은 표면적을 갖는 SnO 나노구조물의 열처리 효과에 관한 연구

김종일, 김기출\*  
목원대학교 신소재화학공학과

### A Study on the Annealing Effect of SnO Nanostructures with High Surface Area

Jong-Il Kim, Ki-Chul Kim\*

Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요 약 이산화주석은 Rutile 구조를 갖는 Oxygen-Deficient n-type 반도체 물질로서, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 등의 가스 분자가 표면에 흡착되면 전기저항이 변하는 특성을 가지고 있고, 이러한 성질을 활용하면 다양한 가스의 감지가 가능하기 때문에 가스센서로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 나노구조물의 경우 Bulk 상태보다 체적 대비 표면적비가 높기 때문에 기체의 흡착이 유리하고, 가스 센서의 성능이 향상될 수 있다. 본 연구에서는 Thermal CVD 공정을 이용하여 SnO Nanoplatelet을 Si 기판 위에 Dense하게 성장시켰다. 기상 수송 방법(Vapor Transport Method)으로 성장된 SnO 나노구조물을 Thermal CVD System을 이용하여 산소분위기에서 830℃ 및 1030℃에서 열처리(Post-Annealing)하여 SnO<sub>2</sub> 상(Phase)을 갖도록 하였다. 열처리 과정 동안 챔버의 압력을 4.2 Torr로 일정하게 유지시켰다. 열처리 된 SnO 나노구조물의 결정학적 특성을 Raman Spectroscopy 및 XRD 분석을 통하여 확인하였고, 형태학적 변화를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy)을 통하여 확인하였다. 분석결과 SnO 나노구조물은 열처리 과정을 통하여 SnO<sub>2</sub> 나노구조물로 상변환 되었다.

**Abstract** Tin dioxide, SnO<sub>2</sub>, is a well-known n-type semiconductor that shows change in resistance in the presence of gas molecules, such as H<sub>2</sub>, CO, and CO<sub>2</sub>. Considerable research has been done on SnO<sub>2</sub> semiconductors for gas sensor applications due to their noble property. The nanomaterials exhibit a high surface to volume ratio, which means it has an advantage in the sensing of gas molecules. In this study, SnO nanoplatelets were grown densely on Si substrates using a thermal CVD process. The SnO nanostructures grown by the vapor transport method were post annealed to a SnO<sub>2</sub> phase by thermal CVD in an oxygen atmosphere at 830℃ and 1030℃. The pressure of the furnace chamber was maintained at 4.2 Torr. The crystallographic properties of the post-annealed SnO nanostructures were investigated by Raman spectroscopy and XRD. The change in morphology was confirmed by scanning electron microscopy. As a result, the SnO nanostructures were transformed to a SnO<sub>2</sub> phase by a post-annealing process.

**Keywords** : tin oxide, annealing effect, nanostructure, vapor transport method, chemical vapor deposition

#### 1. 서론

4차 산업혁명의 시대에 인간과 기기간 상호작용의 범위는 점차 확대될 것으로 전망되고 있으며, IT(information

technology) 및 IoT(internet of things) 기술의 발달로 모바일, 자동차, 헬스케어 등 미래의 핵심 산업에서 첨단 센서의 수요 급증이 전망되고 있다. 특히 산업의 고도화는 에너지 소모를 급격하게 증가시키고 있으며, 화석연

본 논문은 미래창조과학부와 한국연구재단에서 지원하는 2017년도 이공분야 기초연구사업(No. 2017R1A2B4012576)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. This work (Grant No. 2017R1A2B4012576) was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) funded Ministry of Science, ICT and Future Planning of the Korea government.

\*Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon Univ.)

Tel: +82-42-829-7489 email: kckim30@mokwon.ac.kr

Received June 7, 2018

Revised July 24, 2018

Accepted September 7, 2018

Published September 30, 2018

료를 이용하는 에너지원은 온실가스 및 환경 유해가스를 다량으로 배출하고 있어, 이러한 문제를 해결하기 위한 첨단 환경모니터링 가스센서 개발이 시대적으로 요청되고 있다.

이산화주석(SnO<sub>2</sub>)은 상온에서 Rutile 결정구조를 갖는 반도체 물질로서 산소공공 결함(Oxygen-Vacancy Defect)의 n-type 반도체 물질로 알려져 있다. 이러한 결함(Defect)을 가지는 특성 때문에 SnO<sub>2</sub>는 가스 분자가 표면에 흡착되면 저항이 변하는 성질을 이용하여 N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO 등의 가스를 감지할 수 있다[1, 2]. 가스 센서를 제작하는 전통적인 방법은 RF Reactive Magnetron Sputtering을 이용하여 SnO<sub>2</sub>를 박막(Thin Film)의 형태로 제작하는 것이다. 하지만 나노기술의 발달과 더불어서 화학기상증착(Chemical Vapor Deposition)법을 이용하여 30-400 nm의 직경을 갖는 Wire 형태의 SnO<sub>2</sub> 나노구조물을 성장시키면, 체적 대비 높은 표면적을 갖는 SnO<sub>2</sub> 나노구조물의 구조적 특징으로 인하여 가스 센서의 감도가 향상되는 것이 보고되었다[3, 4]. 이외에도 졸-겔(Sol-Gel)법[5], 수열합성(Hydro-thermal)법[6] 등의 방법으로 SnO<sub>2</sub> 나노구조물을 합성할 수 있다. 하지만 졸-겔법과 수열합성법과 같은 용액 기반(Solution Base)의 합성법은 저가이면서 대량 생산이 가능하다는 장점이 있지만 기판(Substrate)의 원하는 위치에 선택적으로 성장하는 것이 힘들다. 반면에 Thermal CVD법은 원하는 기판의 위치에 SnO<sub>2</sub> 나노구조물을 선택적으로 성장하는 것이 가능하며, 성장률(Growth Rate)과 형상의 제어가 가능하다[7, 8]. Thermal CVD를 이용하여 SnO<sub>2</sub>를 합성하는 방법으로는 전구체(Precursor)로부터 SnO<sub>2</sub>를 직접 성장시키는 방법과 특정한 형태의 나노구조물인 SnO를 성장시킨 후, 특정한 조건에서 열처리(Post-Annealing)하여 SnO<sub>2</sub> 상(Phase)으로 전환시키는 두 가지의 메커니즘(Mechanism)이 있다. 열처리 공정을 이용할 경우

Substrate와 Thin Film의 결합력(Bonding)을 향상시키는 것 이외에도, 증착된 박막의 결정성(Crystallinity) 및 Stress/Strain, 광학적 특성(Optical Property) 등의 변화를 조절할 수 있다는 연구 결과들이 보고되었다[9, 10].

본 연구에서는 Thermal CVD를 이용하여 Vapor Transport Method로 체적 대비 높은 표면적을 갖는 독특한 구조의 SnO 나노구조물을 Si 웨이퍼 위에 직접 성장시킨 후, 산소분위기에서 후열처리를 진행하여 SnO<sub>2</sub>로의 상변화를 유도하였으며, 열처리 전후의 결정학적 특성에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 SnO 나노구조물의 성장

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 1500 °C 및 1000 °C 까지 독립적으로 제어할 수 있는 히터가 장착되어있는 Two Zone Thermal CVD 장비를 이용하여 Vapor Transport Method로 체적 대비 높은 표면적을 갖는 독특한 나노구조의 SnO 나노구조물을 성장시켰다. 기판은 1 cm × 1 cm 크기의 Si 기판(Si/SiO<sub>2</sub>(300 nm))을 사용하였다. 성장 실험에 사용되는 Si 기판은 아세톤, 에탄올, 탈이온수(Deionized Water)에 각각 10분씩 초음파 세척 후 N<sub>2</sub> Gun으로 건조시켜 준비하였다. SnO 나노구조물의 성장 실험은 알루미늄 도가니(Alumina Crucible)에 순도 99.9%의 Tin(IV) Oxide Powder(SIGMA-ALDRICH)를 2 g Loading 한 후 고온 히터의 중앙에 위치시켰다. 고온히터의 중심에서 50 cm 만큼 떨어진 위치에 저온용 히터의 중심을 배치시킨 후 저온히터의 중앙에 Si 조각을 분포시켰다. 기판 및 알루미늄 도가니의 지지대로는 내열성이 뛰어난 10 cm × 4 cm 크기의 Quartz Plate를 사용하였다. 이후, 로터리 펌프로 30분간 10<sup>-4</sup> Torr 이하

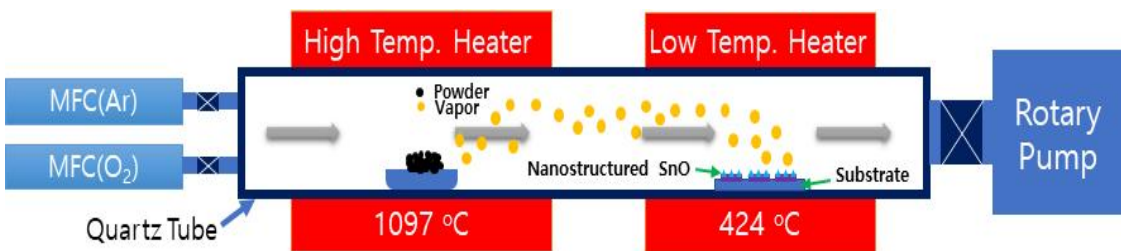


Fig. 1. Schematic diagram of the two zone thermal CVD system used in this research.

의 진공분위기를 유지시킨 후, 고순도 Ar gas (99.999%)를 흘려주면서 2차례 Purging 절차를 거쳤다.  $10^{-4}$  Torr 이하의 진공도를 유지하고 있는 Thermal CVD Chamber에 고순도 Ar Gas를 1000 SCCM으로 일정하게 흘려주며 고온용 히터(High Temp. Heater)를  $18.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 비율로 가열하여 1시간 후  $1097\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 이르도록 하였으며, 저온용 히터(Low Temp. Heater)는  $7.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 비율로 가열하여 1시간 후  $424\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 도달하도록 하였다. 이때 Chamber 내부의 압력을 4.2 Torr로 일정하게 유지시켰으며, 용량형 격막게이지를 이용하여 압력을 측정하였다. 여러 차례 성장 실험을 통하여 확보된 높은 표면적을 갖는 독특한 SnO 나노구조물이 성장되는 온도  $424\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 3시간 동안 SnO 나노구조물을 성장시켰다.

SnO 나노구조물의 성장 실험 후 표면 상태를 광학현미경으로 우선 관찰하였으며, 독특한 나노구조물의 성장 여부를 확연히 관찰할 수 있었다. SnO 나노구조물의 상세한 Morphology는 주사전자현미경(Field-Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)으로 분석하였으며, 성장된 나노구조물의 상(Phase) 및 결정학적 특성을 Raman Spectroscopy와 XRD 분석으로 확인하였다.

## 2.2 SnO의 후열처리

성장된 SnO 나노구조물의 열처리는 High Temp. Heater만을 사용하여 각각  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 30분 동안 진행되었다. 성장된 SnO 나노구조물을 High Temp. Heater 중앙에 위치시켰으며 Quartz Tube 내부의 압력은 SnO 나노구조물의 성장과정과 같은 Ar Purging 절차를 2차례 거친 후 고순도 산소 가스(99.999%)로 대기압과 같은 압력(1 atm)을 갖도록 Quartz Tube 내부를 채워주어 산소분위기 하에서 열처리를 진행하였다. SnO 나노구조물의 열처리에 의한 Morphology 및 결정학적 특성을 각각 FE-SEM, Raman Spectroscopy, XRD 분석으로 확인하였다.

## 2.3 특성분석기술

FE-SEM ; 성장 및 열처리 된 산화주석의 표면구조는 주사전자현미경(Hitachi S4800 with EDS)으로 분석되었다. Charging 현상을 방지하기 위하여 Conducting Layer로 사용되는 Pt 박막을 12 nm의 두께를 갖도록 코팅하였다.

Raman Spectroscopy ; 결정학적 특성은 Raman

Spectroscopy(NOST FEX)로 분석하였다.  $532\text{ nm}$ 의 단파장 LASER(Green)를 사용하였으며, 1 sec 동안 시료에 LASER를 조사하였다. SnO 나노구조물의 열처리 전 시료는 시료의 두께가 충분히 두꺼워 ND Filter를 10%로 하였지만, 열처리 결과 나노구조물의 일부가 Evaporating되어 분석 신호 Peak의 세기가 약해지는 것을 고려하여 ND Filter를 32%로 설정하였다. SnO의 Peak는 파수(Raman Shift)  $110, 210\text{ cm}^{-1}$  근처에서, SnO<sub>2</sub>의 Peak는  $301, 620\text{ cm}^{-1}$  근처에서 확인이 가능하며 Si 기판의 Peak는  $520, 920 - 970\text{ cm}^{-1}$ 에서 확인이 가능하기 때문에 Scan Range는  $0\text{ cm}^{-1} \sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 로 설정하였다. Data Acquisition Mode는 Accumulation Mode가 아닌 Single Mode를 사용하여 신호의 증폭없이 기판에 성장된 나노구조물 시료의 두께를 예측할 수 있도록 하였다.

XRD(X-Ray Diffraction) ; 성장 및 열처리 된 산화주석의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 XRD 분석을 진행하였다. D/MAX-2500(RIGAKU) 장비를 이용하여  $5^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 까지의 Scan Range를  $0.02^{\circ}/\text{min}$ 의 Scan Rate로,  $0.01^{\circ}$ 의 Step Size로 분석하였다. X-ray Source는 Cu-Ka( $\lambda=1.5406\text{ nm}$ )를 사용하였으며 회절패턴을 JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) Card와 비교하여 성장된 Tin Oxide의 상(Phase)을 확인하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Thermal CVD System을 이용하여 Vapor Transport 방법으로 성장된 SnO 나노구조물과 Post-Annealing된 SnO 나노구조물의 FE-SEM 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2의 (a)를 보면 Si 기판 위에서 SnO 나노구조물이 Dense하게 Nano-Platelet의 형태로 성장되었다. 이때 성장된 기판의 온도는  $424\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다. Fig. 2의 (b)와(c)는 성장된 SnO 나노구조물을 각각  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 30분 동안 산소 분위기에서 열처리를 진행한 후에 분석된 이미지이다. 성장된 SnO와 Post-Annealed SnO를 비교하여 보았을 때(Fig. 2의 (b)와(c)의 배율은 같지만 (a)의 배율이 20,000 배임을 고려하여야한다)  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 열처리 하였을 경우 열처리에 의하여 나노구조물의 일부가 녹아내린, 혹은 증발(Evaporating)된 형태를 확인할

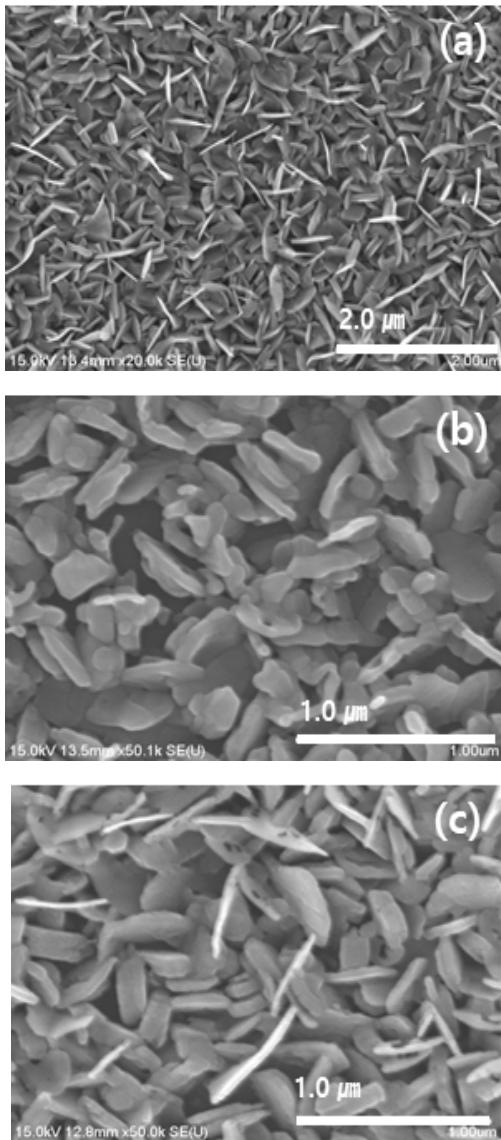
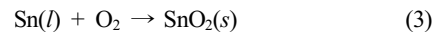
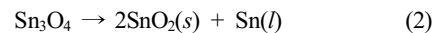
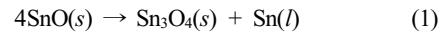


Fig. 2. FE-SEM images of as grown tin oxide nanostructures with different magnification (a)  $\times 20,000$  SnO and (b)  $\times 50,000$  post-annealed SnO at  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (c)  $\times 50,000$  post-annealed SnO at  $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively. (a) shows the morphology of as grown SnO nanostructures which has the shape of vertically aligned platelets with high density. (b) & (c) shows the effect of annealing at  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively. Thermodynamically unstable material, specially SnO, decompose when it heated by high temperature over  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  and it could be a reason about difference in morphology[12].

수 있다.  $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 열처리된 시료의 경우도  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서의 열처리와 큰 차이를 보이지 않았지만, 몇몇 나노구조물의 두께가 얇아진 것을 확인할 수 있으며, 크기 또한 작아진 것으로 보인다. 이것은 성장된 나노구조물의 일부가 Evaporation된 것으로 추정된다.

성장 및 열처리된 SnO 나노구조체의 조성 및 결정학적 특성을 확인하기 위하여 Raman 분석을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 Si 기판위에 성장된 나노구조물의 Raman Spectra이며, 파수  $112, 211\text{ cm}^{-1}$ 에서 Main Peak을 확인할 수 있었다[11]. 이때, SnO Peak의 Intensity가 기판인 Si Peak 보다 훨씬 강하게 나온 것을 확인할 수 있는데 이는 박막의 두께가 충분히 두꺼워 강하게 나온 것이다. Fig. 3(b) 와 3(c)는 각각  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 열처리를 한 뒤의 Raman Spectra이다. 두 가지의 Spectra에서 모두  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  와  $\text{SnO}_2$  peak을  $75, 303, 615\text{ cm}^{-1}$  근처에서 확인할 수 있었으며, SnO Peak은 열처리에 의하여 완벽히 제거되었음을 확인할 수 있었다. 하지만,  $\text{SnO}_2$  Peak의 세기가 기판인 Si Peak 보다 약한 것을 보아 고온에서의 열처리 과정으로 인하여 SnO가 Evaporating된 것으로 추정된다.

SnO의 산화과정에 대하여 Zu Rong Dai 연구그룹에서 연구한 바에 따르면[12] 다음과 같은 3가지의 Formula를 따른다.



위 Formula에 의하면 SnO 나노구조물은 2가지의 Process를 통하여  $\text{SnO}_2$ 로의 산화가 이루어진다. Formula (1)과 (2)의 Decomposition 과정, 그리고 Formula (3)의 Oxidation 과정으로 이루어진다. 따라서 위의 식과 같이 외부의 열로 인하여 분해된 SnO 상(Phase)은  $\text{Sn}_3\text{O}_4(s)$  와  $\text{Sn}(l)$  으로 분해된 후  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  상은 다시  $\text{SnO}_2(s)$  와  $\text{Sn}(l)$ 의 상으로, 그리고 Sn 상은 다시 산소분자와 반응하여  $\text{SnO}_2(s)$  상을 갖게 된다. 여기에서  $s$  그리고  $l$  은 각각 “Solid phase”, “Liquid phase”를 의미한다.

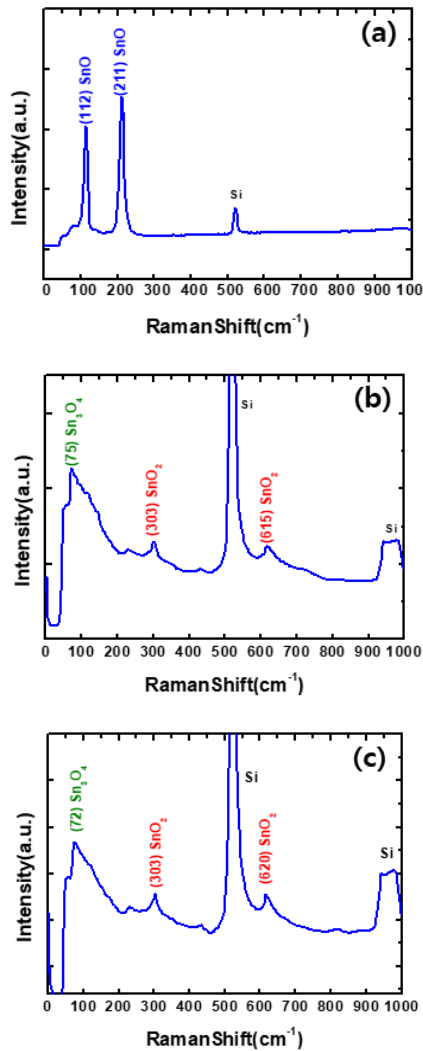


Fig. 3. Raman spectrum of as grown SnO (a), post-annealed SnO at 830 °C (b), and 1030 °C (c) respectively. (a) exhibits the SnO phase. SnO shows its inherent peak near 112  $\text{cm}^{-1}$  and 211  $\text{cm}^{-1}$ . SnO peaks show very high intensity due to their thick thickness and density. (b) & (c) exhibit the  $\text{SnO}_2$  phase and  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  phase. As we can see, there're no more peak near 112  $\text{cm}^{-1}$  and 211  $\text{cm}^{-1}$  which means SnO phase has been removed by post annealing of SnO nanostructures. (b) shows the effect of post-annealing at 830 °C which shows various phase of tin oxide such as  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  and  $\text{SnO}_2$ . Also we can observe that (c) has similar Raman spectrum compare to (b) which means  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  appear during oxidation process of SnO in oxygen atmosphere.

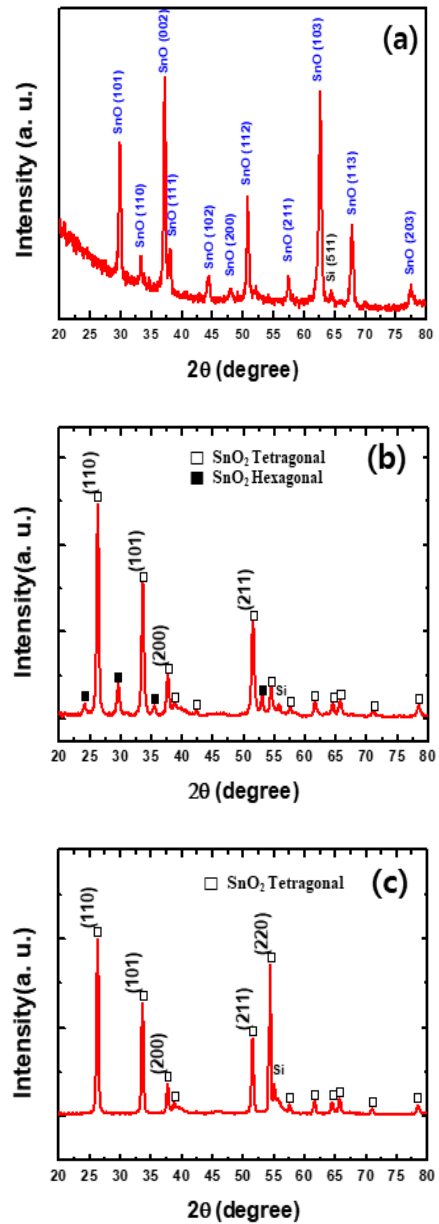


Fig. 4. XRD spectra of as-grown SnO nanoplatelets (a), SnO nanoplatelets undergoing annealing at 830 °C for 30 min in oxygen atmosphere (b), SnO nanoplatelets undergoing annealing at 1030 °C for 30 min in oxygen atmosphere (c). The peak shown in (b) & (c) correspond to  $\text{SnO}_2$  which has rutile structure(JCPDS No. : 41-1445, ICDD No. : 00-021-1250). The peaks marked by a  $\blacksquare$  in the spectrum (b) are contributed from  $\text{SnO}_2$  which has fluorite structure(ICDD No. : 00-029-1484), not a rutile structure.

SnO의 Raman 분석 결과, 열처리 과정을 통하여 SnO의 상변화를 확인하였으며, 보다 정확한 결정학적 특성 분석을 위하여 XRD 분석을 시행하였고, 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Thermal CVD 공정으로 성장 및 열처리된 산화주석 나노구조물의 보다 정확한 결정학적 특성을 분석하기 위하여 XRD 분석을 시행하였고, XRD 분석결과를 JCPDS Card의 회절패턴과 비교하여, 성장 및 열처리된 나노구조물의 결정학적 구조를 확인하였다. Fig 4(a)는 성장된 SnO 나노구조물이 Tetragonal 구조를 가지고 있다는 것을 보여준다. Fig 4(b), (c)는 각각 830 °C, 1030 °C에서 열처리된 SnO의 XRD Spectrum이다. Fig 4(b)를 보면 SnO 나노구조물이 800 °C의 산소분위기에서 열처리 될 경우 SnO<sub>2</sub>로의 상전이가 일어난 것을 확인할 수 있다. Fig 4(b)에 기호(■)로 표시된 것은 Hexagonal 결정구조를 가지는 SnO<sub>2</sub>의 회절패턴이다. 열역학적으로 불안정한 특성을 지니는 Rutile 구조의 SnO는 특정한 압력에서 Tetragonal, Hexagonal 등으로의 결정전이가 일어날 수 있다고 보고된 바 있다[13]. 830 °C에서 열처리 될 경우, Hexagonal과 Tetragonal 두 가지의 결정구조가 함께 존재할 수 있는 복합구조로 결정이 변할 수 있다. Fig 4(c)는 1030 °C에서 열처리된 SnO 나노구조물의 XRD Spectra이다. 1030 °C에서 열처리를 할 경우, SnO의 상이 완벽하게 제거된 것을 확인할 수 있으며, Tetragonal 구조에 산소 공공 결함(Oxygen-Vacancy Defect)을 지니고 있는 SnO<sub>2</sub>로의 상변화(Phase Transformation)가 일어난 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유해가스 환경모니터링에 적용 될 수 있는 소재인 산화주석을 Thermal CVD를 이용하여 직접성장 및 열처리의 효과를 분석하는 연구를 진행하였으며, 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

첫째, SnO 나노구조물의 경우, Si 기판 위에서 높은 표면적을 갖는 Nanoplatelets 형태로 성장되었으며, Raman Spectroscopy 분석결과 Si 기판의 Peak이 약하게 검출된 것으로부터 합성된 박막의 두께가 충분히 두껍게 성장된 것을 알 수 있다.

둘째, 열처리를 진행한 830 °C, 1030 °C 두 경우 모두 미량의 Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Phase가 존재하는 것으로 보이며, 이것은

SnO의 분해 및 산화과정 중에 반응이 완결되지 못하고 남겨진 잔해이다.

셋째, 고온에서 열처리를 진행하여 SnO<sub>2</sub>로 상변환 된 나노구조물의 일부가 기화되어 시료의 두께가 얇아지며, 1000 °C에서 열처리를 할 경우 나노구조물의 일부가 기화되어 전체적인 나노구조물의 Size가 작아진 것으로 보인다. 하지만 완벽하게 Tetragonal 구조의 SnO<sub>2</sub> 나노구조물로 상변환되는 것을 확인할 수 있다.

#### References

- [1] L. E. Smart, E. A. Moore, *Solid State Chemistry : An introduction*, pp.201-204, CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.
- [2] G. Korotcenkov, S. H. Han, B. K. Cho, "Material Design for Metal Oxide Chemiresistive Gas Sensors", *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol.22, No.1, pp.1-17, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.5369/JSST.2013.22.1.1>
- [3] I. Sayago, M. J. Fernandez, J. L. Fontecha, M. C. Horrillo, J. P. Santos, "Synthesis and characterization of SnO<sub>2</sub> nanowires grown by CVD for application as gas sensors", *2015 10th Spanish Conference on Electron Devices (CDE)*, Madrid, Spain, 20 April, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/CDE.2015.7087486>
- [4] M. Di Giulio, G. Moicocci, A. Serra, A. Tepore, R. Rella, P. Siciliano, "SnO<sub>2</sub> thin films for gas sensor prepared by r.f. reactive sputtering", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol.25, No.1-3, pp.465-468, 1995. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0925-4005\(94\)01397-7](https://dx.doi.org/10.1016/0925-4005(94)01397-7)
- [5] M. Aziz, S. S. Abbas, W. R. W. Baharom, "Size-controlled synthesis of SnO<sub>2</sub> nanoparticles by sol-gel method", *Materials Letters*, Vol.91, pp.31-34, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2012.09.079>
- [6] G. E. Patil, D. D. Kajale, V. B. Gaikwad, G. H. Jain, "Preparation and characterization of SnO<sub>2</sub> nanoparticles by hydrothermal route", *International Nano Letters*, Vol.2, No.1, pp.2153-2155, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1186/2228-5326-2-17>
- [7] H. Das, B. Krishnan, G. Melnychuk, Y. Koska, "Local-loading Effect in Low-temperature Selective Epitaxial Growth of 4H-SiC by Halo-carbon Method", *Materials Science Forum*, Vol.600-603, pp.163-166, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.600-603.163>
- [8] S. A. Oh, K. C. Kim "Growth of Two-Dimensional Nanostructured VO<sub>2</sub> on Graphene Nanosheets", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.9, pp.502-507, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.502>
- [9] S. Y. Ma, X. H. Yang, X. L. Huang, A. M. Sun, H. S. Song, H. B. Zhu, "Effect of post-annealing treatment on the microstructure and optical properties of ZnO/PS nanocomposite films", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.566, pp.9-15, 2013.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.02.179>

- [10] M. A. Haque, S. Mahalakshmi, "Effect of Annealing on Structure and Morphology of Cadmium Sulphide Thin Film Prepared by Chemical Bath Deposition", *Journal of Advanced Physics*, Vol.3, No.2, pp.159-162, 2014.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.1166/jap.2014.1116>
- [11] Y. He, D. Li, J. Chen, Y. Shao, J. Xian, X. Zheng, P. Wang, "Sn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>: a novel heterovalent-tin photocatalyst with hierarchical 3D nanostructures under visible light", *RSC Advances*, Vol.4, No.3, pp.1266-1269, 2014.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.1039/C3RA45743E>
- [12] Z. R. Dai, Z. W. Pan, Z. L. Wang, "Growth and Structure Evolution of Novel Tin Oxide Diskettes", *Journal of American Chemical Society*, Vol.124, No.29, pp.8673-8680, 2002.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/ja026262d>
- [13] Y. Li, W. Fan, H. Sun, X. Cheng, P. Li, X. Zhao, J. Hao, M. Jiang, "Optical Properties of the High-Pressure Phases of SnO<sub>2</sub>: First-Principles Calculation", *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol.114, No.2, pp.1052-1059, 2010.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/jp909021r>
- 

김 중 일(Jong-Il Kim)

[준회원]



- 2015년 3월 : 목원대학교 신소재화학공학과 입학
- 2018년 ~ : 목원대학교 신소재화학공학과 학부 4학년

<관심분야>

가스센서, 에너지 관련 소재, 기능성 나노소재, 그래핀

---

김 기 출(Ki-Chul Kim)

[중신회원]



- 1993년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학사)
- 1996년 2월 : 아주대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
- 2002년 2월 : 아주대학교 대학원 물리학과 (이학박사)
- 2002년 4월 ~ 2006년 3월 : 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 신소재화학공학과 교수

<관심분야>

기능성 나노소재, 기능성 박막, 가스센서, 에너지 소재