Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 10 pp. 1-7, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.10.1
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

이산화주석 나노구조물의 성장에서 산소가스 유량이 미치는 영향

김종일, 김기출*
목원대학교 신소재화학공학과

The Influence of Oxygen Gas Flow Rate on Growth of Tin Dioxide Nanostructures

Jong-Il Kim, Ki-Chul Kim*
Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요 약 이산화주석은 리튬 이온 전지의 Anode 전극물질, 또는 H_2, NO, NO_2 등의 가스 분자가 표면에 흡착되면 전기저항이 변하는 특성을 이용하여 가스센서로 활용되고 있으며, 나노구조를 갖는 이산화주석의 합성과 관련하여 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 나노구조물의 경우 Bulk 상태보다 체적 대비 표면적비가 높기 때문에 기체분자의 흡착확률을 높일 수 있으므로 고감도 가스 센서의 구현이 가능하고, Li-ion 이차전지의 경우에도 비정전용량을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 열화학기상증착 장비를 이용하여 기상수송방법으로 SnO_2 나노구조물을 Si 기판 위에 직접 성장시켰다. 이때 이송가스로 이용되는 고순도 Ar 가스에 고순도 산소가스를 혼합하였고, 산소가스의 혼합량에 따라 다른 형태의 산화주석 나노구조물이 성장되는 것을 확인하였다. 기상수송방법으로 성장된 산화주석 나노구조물의 결정학적 특성은 Raman 분광학 및 XRD 분석을 통하여 확인하였고, 표면형상을 주사전자현미경을 통하여 확인하였다. 분석결과 산화주석 나노구조물은 산소가스 혼합량에 민감하게 영향을 받았으며, 이송가스로 이용되는 고순도 Ar 1000 SCCM에 고순도 산소가스 10 SCCM을 혼합하였을 때, 적당한 두께를 가지면서 Nanodots 형태의 표면형상을 갖는 SnO_2 결정상의 나노구조물이 성장되는 것을 확인하였다.

Abstract Tin dioxide, SnO_2, is applied as an anode material in Li-ion batteries and a gas sensing materials, which shows changes in resistance in the presence of gas molecules, such as H_2, NO, NO_2 etc. Considerable research has been done on the synthesis of SnO_2 nanostructures. Nanomaterials exhibit a high surface to volume ratio, which means it has an advantage in sensing gas molecules and improving the specific capacity of Li-ion batteries. In this study, SnO_2 nanostructures were grown on a Si substrate using a thermal CVD process with the vapor transport method. The carrier gas was mixed with high purity Ar gas and oxygen gas. The crystalline phase of the as-grown tin oxide nanostructures was affected by the oxygen gas flow rate. The crystallographic property of the as-grown tin oxide nanostructures were investigated by Raman spectroscopy and XRD. The morphology of the as-grown tin oxide nanostructures was confirmed by scanning electron microscopy. As a result, the SnO_2 nanostructures were grown directly on Si wafers with moderate thickness and a nanodot surface morphology for a carrier gas mixture ratio of Ar gas 1000 SCCM : O_2 gas 10 SCCM.

Keywords : tin dioxide, nanostructure, vapor transport method, chemical vapor deposition, oxygen flow rate

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 July 9, 2018 Revised (1st August 2, 2018, 2nd August 14, 2018)
Accepted October 5, 2018 Published October 31, 2018

1. 서론

현재 인류는 생활의 편의도모 및 산업화를 위하여 많은 에너지를 소모하고 있으며, 이러한 에너지의 상당부분은 화석연료에 의존하고 있다. 화석연료를 이용하여 에너지를 생산하는 과정에서 필연적으로 온실가스인 이산화탄소를 배출하여 지구온난화를 가속시키고 있으며, 화석연료는 환경유해가스도 다량으로 배출하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 온실가스 및 환경유해가스를 방출하지 않는 청정재생 에너지원의 개발이 시대적으로 요청되고 있다. 현재 상용화되어 있는 청정재생 에너지원은 태양전지, 풍력발전이 대표적인데, 태양전지는 낮 동안에만 발전이 가능하고, 풍력발전의 경우도 바람이 불 때에만 발전이 가능하기 때문에, 청정재생 에너지원으로 발전된 전력을 저장하였다가 필요시에 사용할 수 있도록 해주는 대용량 전력저장장치(ESS, Energy Storage System)의 개발은 매우 중요한 문제가 되었다.

이산화주석(Tin Dioxide, SnO_2)은 상온에서 3.6 eV의 에너지 밴드갭을 갖는 n-type 반도체 물질로서, 저가 및 환경친화적 특성과 이론적으로 높은 비정전용량(Specific Capacity)을 가지고 있어 리튬 이온 전지의 Anode 소재로 주목받고 있다[1-3]. 또한 산소공공 결함(Oxygen-Vacancy Defect) 특성을 갖고 있으므로 가스 분자가 표면에 흡착되면 전기저항이 변하는 성질을 이용하여 가스센서로 응용되고 있다[4,5]. 특히 최근에는 높은 전기전도도와 전자 이동도(Mobility) 및 Flexible 특성을 가지고 있는 그래핀 나노시트의 특성과 이산화주석의 특성을 결합시킨 복합 Nanocomposites를 합성하여 리튬 이온 전지, 슈퍼커패시터, 가스 센서 등 다양한 분야에 응용되고 있다[6-9].

이산화주석의 나노구조물 합성을 위하여 다양한 방법이 연구되었는데, Zu Rong Dai 등의 Nanodisk[10] 외에도 Nanoflower[11], Nanorod[12], Nanoparticle[13] 및 Nanobelt[14] 등의 다양한 표면형상을 갖는 이산화주석 나노구조물이 Sol-gel, Hydrothermal, PECVD, RF 마그네트론 스퍼터링 등의 방법으로 합성되었다. 하지만, 열화학기상증착법에서 산화주석 증기와 산소 기체의 반응을 유도하여 형상이 제어된 이산화주석 나노구조물의 합성에 대해서는 보고된 바가 없다. 일반적으로 금속 산화물은 활성기체인 O_2의 함량에 따라 반응 및 결합하는 메커니즘이 다르고, 나노구조물의 성장률 및 결정학적 특성이 다르다고 보고되어 있다[15,16]. 따라서 SnO_2 나노구조물의 표면형상을 제어하고, 결정학적 상(Crystalline Phase)을 제어하는 나노구조물 합성연구는 이산화주석 나노구조물과 그래핀 나노시트의 복합 Nanocomposites 합성에 적용하여 고감도 가스센서 및 대용량 축전지 제작 등에 응용될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 열화학기상증착 장비를 이용하여 고순도 산화주석 파우더를 고온에서 증기화시키고, 이송가스로 기판 위로 증기를 수송하여 기판 위에서 이산화주석 나노구조물이 직접 성장되도록 하였다. 이송가스는 고순도 Ar가스와 O_2가스를 혼합하여 주입하였다. 그 결과 혼합되는 산소가스의 유량에 따라 합성되는 나노구조물의 표면형상 및 결정학적 특성이 상이함을 확인하였다.

2. 실험방법

이산화주석 나노구조물의 성장은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 각각 1500 ℃ 및 1000 ℃까지 독립적으로 제어가 가능한 두 개의 히터가 장착되어 있는 두 영역 열화학기상증착(Two Zone Thermal CVD) 시스템을 이용하여 기상수송방법(Vapor Transport Method)으로 실리콘 기판 위에 성장시켰다. Tin(IV) Oxide Powder(99.9%, Sigma Aldrich)를 알루미나 도가니에 3.0 g 장착한 후 고온용 히터의 중앙에 위치시켰으며, 고온용 히터를 가

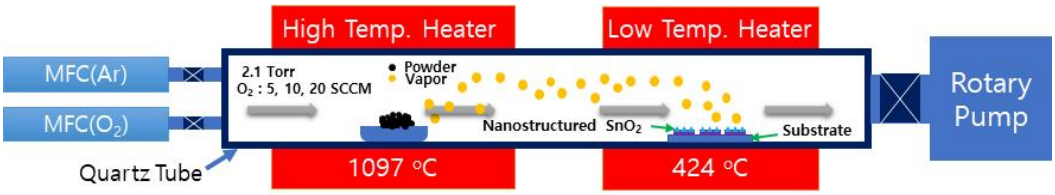

Fig. 1. Schematic diagram of the thermal CVD system in this research.

열하여 1시간 후에 1097 ºC에 이르도록 하고, 3시간 동안 전구체를 증기화 시켰다. 이산화주석 나노구조물의 성장은 작은 크기의 저온용 히터의 중앙에 기판을 위치시키고, 1시간 후에 424 ºC에 이르도록 가열하였으며 3시간 동안 온도를 유지하면서 이산화주석 나노구조물이 성장되도록 하였다. 기판으로 사용된 실리콘 웨이퍼는 아세톤, 에탄올, 탈이온수를 이용하여 각각 10 분씩 세척하고, 고순도 질소가스(99.999%) 건(gun)으로 건조시켰다. 두 영역 열화학기상증착 시스템은 로터리 펌프를 이용하여 5×10^{-4} Torr 이하의 수준으로 진공을 유지시킨 후, 고순도 Ar 가스(99.999%)를 이용하여 2차례 Purging 공정을 수행한 다음, 고순도 Ar 가스와 O_2 가스를 혼합하여 흘려주었으며, 이때 CVD 장비의 내부 압력은 게이트 밸브를 조절하여 2.1 Torr로 일정하게 유지시켜 주었다. 이산화주석 나노구조물이 성장되는 열화학기상증착 장비의 쳄버 내부의 압력은 공정 가스의 종류에 무관하게 진공도를 측정할 수 있는 용량형 격막 게이지(Capacitance Manometer)로 측정하였다. 이송 가스는 질량 유량 제어기(MFC)를 이용하여 Ar : O_2의 비율이 각각 Ar = 1000 SCCM : O_2 = 5, 10 & 20 SCCM이 되도록 조절하였다.

이산화주석 나노구조물의 성장실험 후에 광학현미경으로 시료를 관찰하였을 때 두껍게 성장된 O_2 = 20 SCCM의 경우에는 나노구조물의 성장유무를 광학현미경으로 관찰할 수 있었지만, O_2 = 5, 10 SCCM의 경우에는 나노구조물의 성장유무를 확인할 수 없었다. 성장된 산화주석 나노구조물의 표면형상은 전계방출형 주사전자현미경으로 분석하였으며, 대전효과(Charging Effect)를 최소화하기 위하여 12 nm 두께의 Pt 박막을 스퍼터링으로 증착하였다. 성장된 산화주석 나노구조물의 결정학적특성은 Raman 분광법 및 XRD 분석을 통하여 분석하였다. Raman 분광기(NOST FEX)는 532 nm의 단파장을 조사하여 100~1000 cm^{-1} 범위에 대하여 Raman Shift를 관찰하였고, X-Ray 회절법 (D/MAX-2500, RIGAKU)은 2theta 분석법으로 5º~80º의 영역을 4º/min의 Scan Rate로 분석하여 성장된 나노구조물의 XRD 패턴을 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

두 영역 열화학기상증착 시스템을 이용하여 이송가스인 아르곤과 산소의 Flow Rate를 변화시키면서 424 ºC 영역에서 성장된 산화주석 나노구조물의 FE-SEM 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a) 와 Fig. 2(b)를 보면 Nanodots의 형태로 SnO_2 나노구조물이 성장된 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 2(b)의 경우 Fig. 2(a)보다 비교적 균일하며 높은 밀도로 Si 기판 위에 나노구조물이 성장되었다. Fig. 2(a)의 경우 일부 나노구조물의 크기가 확연하게 다른 것을 볼 수 있는데, 이것은 Vapor의 고상화 과정에서 일부 영역에서 조기에 Nucleation 되고 이후에 전체적으로 Nanodots이 성장된 것으로 추정된다.

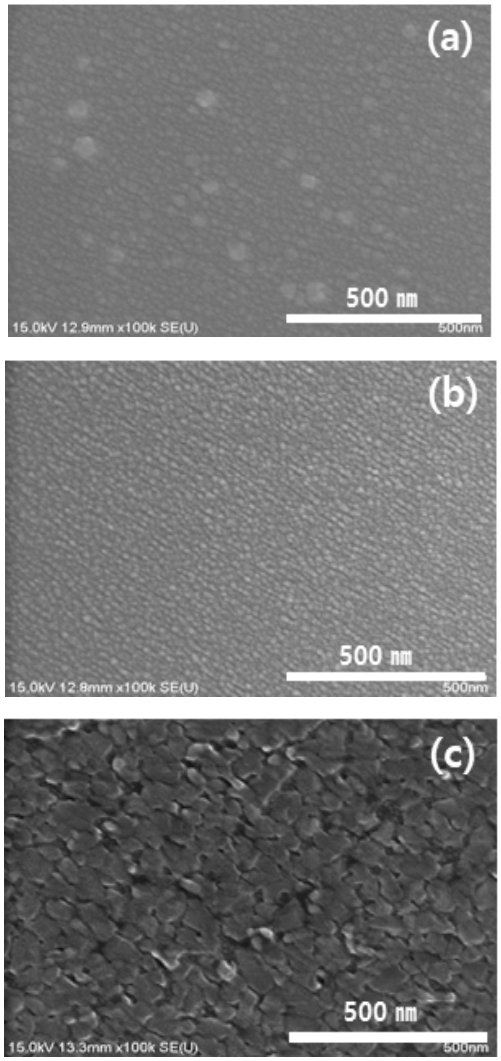

Fig. 2. FE-SEM images of as grown tin oxide nanostructures with same magnification(×100,000) for different growth conditions. Ar : O_2 ratio is 1000 SCCM : (a) 5 SCCM, (b) 10 SCCM, (c) 20 SCCM, respectively.

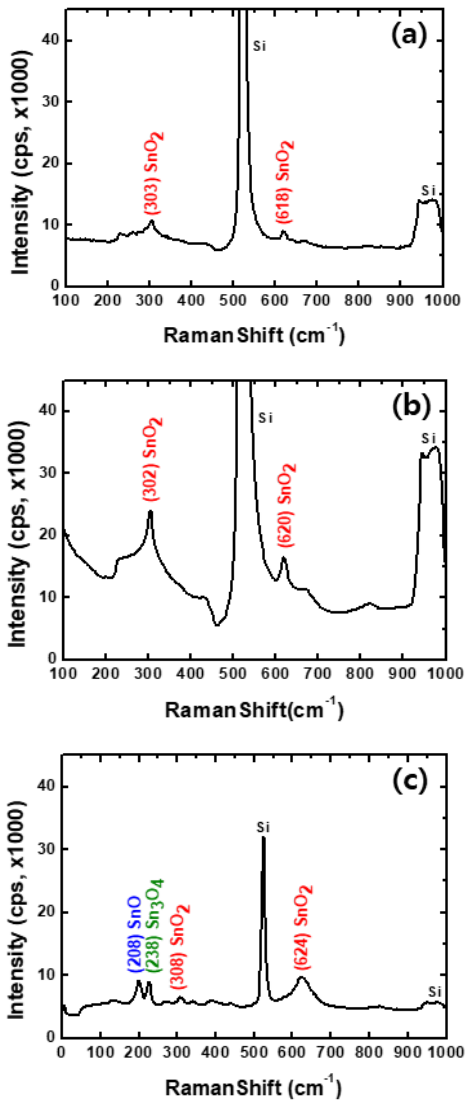

Fig. 3. Raman Spectra of as grown tin oxide nanostructures on Si wafer with various ratio of gas flow rate Ar(SCCM) : O_2(SCCM) (a) 1000 : 5, (b) 1000 : 10, and (c) 1000 : 20, respectively.

반면에 Fig. 2(b)의 표면형상은 전체적으로 균일한 크기의 Nanodots 형태이며, 이것은 기판의 전체 영역에서 균일하게 Nucleation이 진행되면서 성장된 것으로 판단된다. 따라서 활성화 기체인 O_2의 유량에 따라서 산화주석 Vapor의 고상화 반응과 성장 메커니즘이 다르게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 2(c)를 보면 산소가스를 5, 10 SCCM으로 흘렸을 때와는 상이한 표면형상을 갖는 나노구조물이 성장된 것을 확인할 수 있다. 이것은 Raman 분광학 분석결과인 Fig. 3(c)와 XRD 분석결과인 Fig. 4(c)에서 확인할 수 있는 것처럼 산소가스의 유량을 20 SCCM으로 흘렸을 때에는 Sn_2O_3, Sn_3O_4, SnO_2 등의 다양한 결정학적 상이 혼재되어 비교적 두꺼운 나노구조물이 성장된 것을 알 수 있다. Y. Abe 연구그룹과 A. C. Iniguez 연구그룹에서는 산소 유량에 따른 RuO_2 및 TiO_2 박층 성장에 관한 연구결과를 보고하였는데 [17,18], 특정한 산소 유량에서 나노구조물의 형태 변화를 관찰 할 수 있고, 그러한 변화는 산소의 유량에 따라 증기화 된 금속과 산소와의 반응 메커니즘이 다르기 때문이라고 주장한 바 있다. 따라서 Fig. 2(c)의 표면형상 특성은 산소가스의 유량 증가에 따라서 다양한 결정학적 상의 Tin Oxide가 혼재되어 성장된 결과임을 알 수 있다.

성장된 산화주석 나노구조물의 결정학적 특성을 조사하기 위하여 Raman 분광학 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. (3)a 와 Fig. 3(b)를 보면 산소가스 유량을 5, 10 SCCM으로 흘렸을 경우 오직 SnO_2 결정상만을 갖는 나노구조물이 성장되었음을 확인할 수 있다. SnO_2의 주요 피크는 301, 620 cm^{-1} 근처에서 확인할 수 있다. 또한 기판으로 사용된 실리콘 피크의 세기가 SnO_2 신호보다 매우 강하게 나타난 것으로부터 수 nm의 얇은 두께를 갖는 SnO_2 나노구조물이 성장된 것으로 유추할 수 있다. 특히 산소의 유량이 5 SCCM 일 때에는 SnO_2 상의 신호가 미약하지만 10 SCCM 일 때에는 SnO_2 상의 신호가 상당히 세어진 것을 통하여 결정성이 양호한 적절한 두께의 SnO_2 나노구조물의 성장을 확인할 수 있다. 하지만 산소가스의 유량을 20 SCCM으로 흘리면서 성장된 Fig. 3(c)의 경우, SnO, Sn_3O_4, SnO_2 등의 결정상으로부터 기인하는 피크가 208, 238, 308, 624 cm^{-1} 근처에서 나타남을 확인 할 수 있다. 이것은 Fig. 2(c)에서처럼 복잡한 표면형상을 갖는 경우에는 결정학적 상 또한 다양하게 갖는 것으로 판단된다. 특히 실리콘 기판 피크의 세기와 이산화주석 피크의 상대적 크기를 비교해 보았을 때, Si Peak/SnO_2(624 cm^{-1}) Peak의 비가 4.5를 나타내었다. 산소가스의 유량이 각각 5, 10 SCCM인 Fig. 2(a)와 (b)는 실리콘 피크와 이산화주석 피크의 비가 약 21인 것을 감안하면, 산소가스의 유량이 20 SCCM인 경우에는 비교적 두꺼운 두께와 다양한 결정상을 갖는 산화주석 나노구조물이 성장된 것을 알 수 있다.

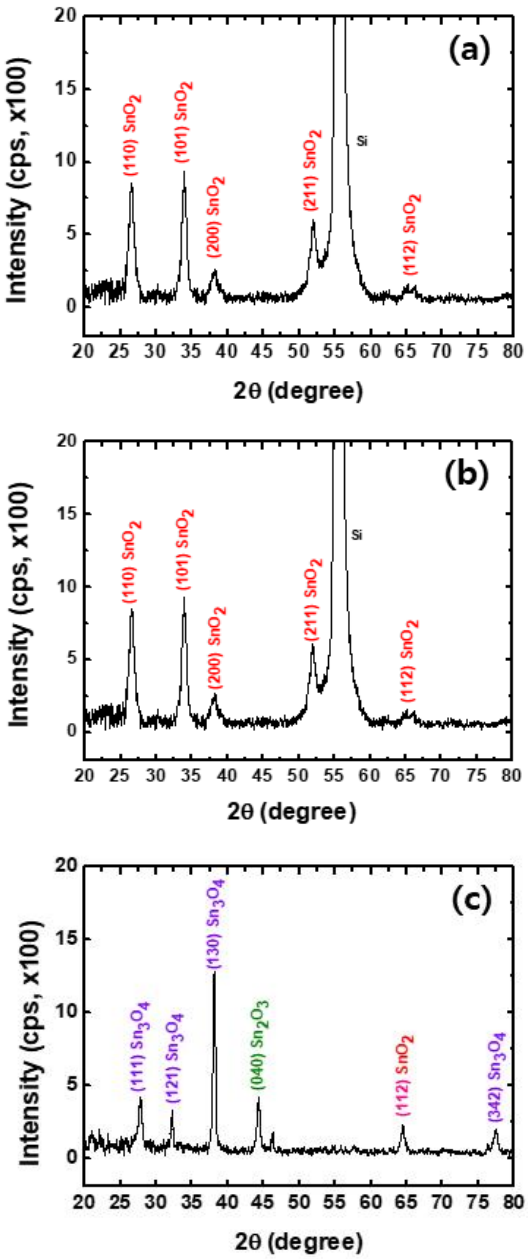

Fig. 4. XRD patterns of as grown tin oxide for different growth conditions. The ratio of Ar : O_2 gas flow rate is 1000 SCCM : (a) 5 SCCM, (b) 10 SCCM, and (c) 20 SCCM, respectively.

보다 자세한 결정학적 분석을 위하여 XRD 분석을 시행하였으며, 그 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. XRD 분석 결과를 JCPDS Card와 비교하여 성장된 나노구조물의 결정구조와 결정상을 확인하였다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)를 보면 산소가스의 유량이 5, 10 SCCM의 경우, Tetragonal 결정구조(JCPDS No. : 41-1445, SnO_2)의 SnO_2 나노구조물이 성장한 것을 확인할 수 있다. 하지만 산소가스의 유량을 20 SCCM으로 혼합하여 성장된 Fig. 4(c)의 경우 Sn_2O_3, Sn_3O_4, SnO_2의 상을 갖는 산화주석이 각각 Triclinic 및 Tetragonal의 결정구조를 가지고 성장한 것을 확인할 수 있다. (JCPDS No. : 25-1249(Sn_2O_3), 16-0737(Sn_3O_4)). 또한 기판인 실리콘의 피크가 관찰되지 않는 것으로부터 성장된 나노구조물의 두께가 비교적 두껍게 성장된 것으로 판단할 수 있다.

XRD 분석 결과와 Fig. 2와 Fig. 3에서 확인 할 수 있는 FE-SEM 및 Raman 분광학 분석결과를 종합적으로 검토하면 O_2 가스의 유량이 5, 10 SCCM일 경우에는 유사한 표면형상을 가지면서 오직 SnO_2 상의 결정학적 특성을 갖는 산화주석 나노구조물이 성장하는 것을 알 수 있고, 산소가스의 유량을 10 SCCM으로 혼합하여 성장된 산화주석이 보다 균일한 표면형상과 결정학적 특성을 나타내는 것으로 판단된다. 하지만 산소가스의 유량이 20 SCCM 이상인 조건에서는 산화주석의 여러 결정학적 상이 혼재된 형태로 산화주석 나노구조물이 비교적 두껍게 성장됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 열화학기상증착 시스템을 이용하여 가스센서 및 리튬 이온 전지의 Anode 물질로 많은 연구가 진행되고 있는 산화주석 나노구조물을 기상수송방법으로 성장시켰다. 특히 이송가스인 Ar/O_2의 비율을 변화시키면서 산화주석 나노구조물을 성장시켰으며, 주사전자현미경, Raman, XRD 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 산화주석 나노구조물의 경우 424 ℃ 영역에서 이송가스인 아르곤 가스 1000 SCCM에 산소가스를 10 SCCM 이하로 혼합하여 성장하였을 때, Nanodots 형태의 표면형상을 가지면서, 오직 SnO_2 결정상만을 갖는 나노구조물이 성장되었다.

둘째, 이송가스 아르곤 1000 SCCM에 산소가스를 20 SCCM으로 혼합하여 성장하였을 경우에는 SnO_2 및 Sn_2O_3, Sn_3O_4등의 다양한 상이 혼재되어 성장되었다. 또한 성장된 나노구조물의 두께도 비교적 두껍게 성장된 것으로 분석되

었다. 이러한 결과는 활성화 기체인 O_2의 양에 따라 나노구조물의 성장 메커니즘이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

셋째, 이송가스인 아르곤 1000 SCCM에 산소가스를 10 SCCM으로 혼합하여 성장된 이산화주석 나노구조물은 산소가스가 5 SCCM인 경우보다 균일한 표면형상과 결정학적 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

이러한 나노구조물 산화주석의 성장경향을 적용하여 그래핀/이산화주석 Nanocomposites를 합성한다면 높은 감도를 갖는 고성능 가스 센서의 제작이 가능할 것으로 기대된다. 또한 고성능 리튬 이온 전지의 Anode 소재의 합성이 가능할 것으로 전망된다.

References

[1] J. H. Kim, K. M. Jeon, J. S. Park, Y. C. Kang, "Excellent Li-ion storage performances of hierarchical SnO-SnO_2 composite powders and SnO nanoplates prepared by one-pot spray pyrolysis", *Journal of Power Sources*, Vol.359, pp.363-370, 2017.
DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.105

[2] J. H. Shin, J. Y. Song, "Electrochemical properties of Sn-decorated SnO nanobranches as an anode of Li-ion battery", *Nano Convergence*, Vol.3, No.1, Aritlcle ID 9, 2016.
DOI: https://dx.doi.org/10.1186/s40580-016-0070-1

[3] L. Zhang, H. B. Wu, X. W. Lou, "Growth of SnO_2 nanosheet arrays on various conductive substrates as integrated electrode for lithium-ion batteries", *Materials Horizons*, Vol.1, pp.133-138, 2014.
DOI: https://dx.doi.org/10.1039/C3MH00077J

[4] S. Maeng, S. W. Kim, D. H. Lee, S. E. Moon, K. C. Kim, A. Maiti, "SnO_2 Nanoslab as NO_2 Sensor: Identification of the NO_2 Sensing Mechanism on a SnO_2 Surface", *ACS Applied Materials and Interfaces*, Vol.6, No.1, pp.357-363, 2014.
DOI: https://dx.doi.org/10.1021/am404397f

[5] L. Mei, Y. Chen. J. Ma, "Gas Sensing of SnO_2 Nanocrystals Revisited: Developing Ultra-Sensitive Sensors for Detecting the H_2S Leakage of Biogas", *Scientific Reports*, Vol.4, Article No.6028, 2014.
DOI: https://dx.doi.org/10.1038/srep06028

[6] Y. Deng, C. Fang, G. Chen, "The developments of SnO_2/graphene nanocomposites as anode materials for high performance lithium ion batteries: A review", *Journal of Power Sources*, Vol.304, pp.81-101, 2016.
DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.11.017

[7] Y. Yang, X. Zhao, H. E. Wang, M. Li, C. Hao, M. Ji, S. Ren, G. Cao, "Phosphorized SnO_2/graphene heterostructures for highly reversible lithium-ion storage with enhanced pseudocapacitance", *Journal of Materials Chemistry A*, Vol.6, No.8, pp.3479-3487, 2018.
DOI: https://dx.doi.org/10.1039/C7TA10435A

[8] G. H. Jeong, S. Baek, S. Lee, S. W. Kim, "Metal Oxide/Graphene Composites for Supercapacitive Electrode Materials", *Chemistry An Asian Journal*, Vol.11, No.7, pp.949-964, 2016.
DOI: https://dx.doi.org/10.1002/asia.201501072

[9] S. G. Chatterjee, S. Chatterjee, A. K. Ray, A. K. Chakraborty, "Graphene-metal oxide nanohybrids for toxic gas sensor: A review", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol.221, pp.1170-1181, 2015.
DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2015.07.070

[10] 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

[11] Y. Wang, M. Guo, M. Zhang, X. Wang, "Hydrothermal synthesis of SnO_2 nanoflower arrays and their optical properties", *Scripta Materialia*, Vol.61, No.3, pp.234-236, 2009.
DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.03.040

[12] X. Zhou, W. Fu, H. Yang, Y. Mu, J. Ma, L. Tian, B. Zhao, M. Li, "Facile fabrication of transparent SnO_2 nanorod array and their photoelectrochemical properties", *Materials Letters*, Vol.93, pp.95-98, 2013.
DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2012.11.050

[13] A. Ayeshamariam, C. Sanjeeviraja, R. Perumal Samy, "Synthesis, Structural and Optical Characterizations of SnO_2 Nanoparticles", *Journal on Photonics and Spintronics*, Vol.2, No.2, pp.4-8, 2013.

[14] Y. Cheng, R. Yang, J. P. Zheng, Z. L. Wang, P. Xiong, "Characterizing individual SnO_2 nanobelt field-effect transistors and their intrinsic responses to hydrogen and ambient gases", *Materials Chemistry and Physics*, Vol.137, No.1, pp.372-380, 2012.
DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.09.037

[15] M. A. Baker, H. Fakhouri, R. Grilli, J. Pulpytel, W. Smith, F. Arefi-Khonsari, "Effect of total gas pressure and O_2/N_2 flow rate on the nanostructure of N-doped TiO_2 thin films deposited by reactive sputtering", *Thin Solid Films*, Vol.552, pp.10-17, 2014.
DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.11.111

[16] Y. M. Lu, J. Jiang, C. Xia, B. Kramm, A. Polity, Y. B. He, P. J. Klar, B. K. Meyer, "The influence of oxygen flow rate on properties of SnO_2 thin films grown epitaxially on c-sapphire by chemical vapor deposition", *Thin Solid Films*, Vol.594, Part B, pp.270-276, 2015.
DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2015.04.010

[17] Y. Abe, Y. Kaga, M. Kawamura, K. Sasaki, "Effects of O_2 gas flow ratio and flow rate on the formation of RuO_2 thin films by reactive sputtering", *Journal of Vaccum Science & Technology B*, Vol.18, pp.1348-1351, 2000.
DOI: https://dx.doi.org/10.1116/1.591385

[18] A. C. Iniguez, R. R. Campomanes, M. H. Tabacnics, D. Comedi, "Influence of O_2 flow rate on growth rate, composition and structure of RF-Sputtered TiO_x films", *Revista Brasileira de Aplicacoes de Vacuo*, Vol.22, No.1, pp.22-24, 2003.

김 종 일(Jong-Il Kim) [준(학생)회원]

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

<관심분야>
가스센서, 에너지 관련 소재, 기능성 나노소재, 그래핀

김 기 출(Ki-Chul Kim) [종신회원]

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

<관심분야>
기능성 나노소재, 기능성 박막, 가스센서, 에너지 관련 소재