

SnO₂ 나노구조의 성장에서 기판 표면의 효과

김기출
목원대학교 식품제약학부

Effect of Substrate Surface for Growth of SnO₂ Nanostructure

Ki-Chul Kim

Division of Food and Pharmaceutical Technology, Mokwon University

요약 그래핀 기반의 금속 산화물 나노구조는 그래핀 나노시트의 우수한 특성 때문에 뛰어난 전기화학적 특성을 나타낸다. 하지만 그래핀 나노시트 표면에 금속 산화물 나노구조를 직접 성장시키는 일은 아직 도전적인 과제로 남아있다. 본 연구에서는 SnO₂ 나노구조를 열화학기상증착 공정을 이용하여 기상수송법으로 다양한 기판 위에 직접 성장시켰다. 특히 SnO₂ 나노구조의 직접 성장에서 기판 표면의 효과를 조사하기 위하여, HOPG(Highly Oriented Pyrolytic Graphite)로부터 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트, Cu foil 위에 열화학기상증착 공정으로 성장시킨 그래핀 나노시트 및 Si 웨이퍼 위에 SnO₂ 나노구조를 기상수송법으로 동일하게 성장시켰다. 성장된 SnO₂ 나노구조의 표면형상은 전계방출 주사전자현미경으로 조사하였고, 박리된 그래핀 나노시트 및 합성된 그래핀 나노시트의 특성은 Raman 분광학으로 분석하였다. 그 결과 Si 웨이퍼 기판보다 그래핀 나노시트 기판 위에서 SnO₂ 나노구조가 활발하게 성장되었다. 그래핀 나노시트 표면에서의 활발한 SnO₂ 나노구조의 성장효과를 조사하기 위하여 X선광전자분광법(XPS, X-ray photoelectron spectroscopy)으로 그래핀 나노시트 표면상태를 조사하였다. 그 결과 그래핀 나노시트의 표면에 형성된 카르보닐 기능이 SnO₂ 나노구조의 특이한 성장을 유도한 것으로 판단된다. 그래핀 나노시트 위에 직접 성장된 SnO₂ 나노구조는 우수한 전기화학적 특성으로 인하여 고감도 가스센서 및 고성능 리튬이온전지의 음극소재로 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

Abstract Graphene-based metal oxide nanostructures exhibit outstanding electrochemical performance because of the superior properties of graphene nanosheets. On the other hand, the direct growth of metal oxide nanostructures on graphene nanosheet surfaces remains a challenge. In this study, SnO₂ nanostructures were grown directly on various substrate surfaces using the thermal CVD (chemical vapor deposition) process via a vapor transport method. The effect of the substrate surface was examined by growing SnO₂ nanostructures on various substrate surfaces with the same method (vapor transport method) for a mechanically cleaved graphene nanosheet of highly oriented pyrolytic graphite, graphene nanosheets synthesized on Cu foil by thermal CVD, and Si wafers. The surface morphology of the SnO₂ nanostructure was characterized by field-emission scanning electron microscopy. The properties of cleaved and synthesized graphene nanosheets were characterized by Raman spectroscopy. SnO₂ nanostructures were actively grown on graphene nanosheets rather than Si wafer substrates. The effect of the substrate surface for active growth of SnO₂ nanostructure on graphene nanosheet was examined by characterizing the surface condition of graphene nanosheet by X-ray photoelectron spectroscopy. The active growth of the SnO₂ nanostructure was induced by the carbonyl functional groups on the surface of the graphene nanosheet. The SnO₂ nanostructure on graphene nanosheet would be applied to highly sensitive gas sensors or anode material of advanced lithium-ion batteries because of the superior electrochemical properties.

Keywords : Direct Growth, Graphene, SnO₂ Nanostructure, Surface Effect, Vapor Transport Method

*Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon University)

email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received May 8, 2023

Revised June 9, 2023

Accepted July 7, 2023

Published July 31, 2023

1. 서론

이산화주석(tin dioxide, SnO₂)은 저가의 n-type 반도체 물질로서 상온에서 3.6 eV의 밴드갭 에너지를 갖고 있으며, 환경친화적 특성을 갖고 있어서 고감도 가스센서에 활용되고 있다[1,2]. 또한 이론적 전기용량이 현재 상용화된 흑연(graphite)의 372 mAh/g보다 2배 이상 높은 782 mAh/g을 갖고 있으며 구동전압이 낮아서 고성능 리튬이온 이차전지의 음극소재(anode material)로 주목을 받고 있다[3,4]. 특히 그래핀 기반의 금속 산화물 나노구조는 그래핀나노시트의 우수한 특성으로 인하여 전기화학적 특성이 뛰어나기 때문에 고감도 가스센서의 감지물질 및 고성능 리튬이온 이차전지의 음극소재로 많은 주목을 받고 있다[3-6]. 하지만 그래핀 나노시트 위에 이산화주석 나노구조를 직접 성장시키는 일은 아직도 도전적인 과제로 남아있다[3].

그래핀 나노시트의 독특한 물리적 특성에 기인하는 그래핀 나노시트 기반의 SnO₂ 나노구조는 우수한 전기화학적 특성을 갖기 때문에 고감도 가스센서의 감지물질 및 고성능 리튬이온 이차전지의 음극소재로 활용되는데, SnO₂@graphene 나노복합소재는 주로 화학적 방법(chemical route)으로 합성된다[3,5,6]. 대표적인 합성 방법은 graphite powder를 산화시켜서 graphene oxide를 용액상태로 얻는 Hummer's 법이 활용된다. Hummer's법으로 합성된 graphene oxide 용액과 주석산화물 전구체를 혼합한 후, 수열합성법으로 tin oxide@graphene oxide 나노복합소재를 합성하는 방법이 가장 많이 사용된다[3,5,6]. 이러한 방법은 비교적 간단하게 다량의 SnO₂@graphene 나노복합소재를 합성할 수 있는 장점이 있지만, 고감도 가스센서의 감지물질로 적용하기 위해서는 별도의 공정으로 전극과 전극 사이에 가스 감지물질을 도포하는 공정이 필요하다[5,6]. 또한 SnO₂@graphene 나노복합소재를 리튬이온 이차전지의 음극소재로 적용하기 위해서는 SnO₂@graphene 활물질 외에도 바인더 및 첨가제와 도전재를 혼합하여 슬러리(slurry)로 제작하고 Cu foil과 같은 전극 물질 위에 탁터 블레이드법 등으로 균일한 두께로 도포해야만 리튬이온 이차전지의 음극물질로 적용할 수 있다[3,4].

본 연구에서는 우수한 전기화학적 특성을 갖는 SnO₂@graphene 나노복합소재를 기판 위에 직접 성장시키는 연구를 수행하였다. 특히 고감도 가스센서의 감지물질로 적용되는 SnO₂@graphene 나노복합소재를 별도의 공정이 필요하지 않도록 기판 위에 직접 성장시

키는 방법을 제시하였다. 또한 고성능 리튬이온 이차전지의 음극소재로 적용하기 위하여 활물질과 도전제 및 첨가제와 바인더를 첨가하여 슬러리를 제작하고, 별도의 코팅 공정으로 음극 소재를 제작하는 공정이 생략 가능한 SnO₂@graphene 나노복합소재의 고성능 리튬이온 이차전지 음극 제작의 방법을 제시하였다. 이를 위해서 Cu foil 위에 그래핀 나노시트를 성장시키고, 그 위에 SnO₂ 나노구조를 직접 성장시키는 공정에 대하여 연구하였다. 즉 Cu foil 위에 직접 성장된 SnO₂@graphene 나노복합구조를 리튬이온 이차전지의 음극소재로 적용할 수 있다.

특히 본 연구에서는 SnO₂@graphene 나노구조의 합성에 있어서 기판표면의 효과에 대하여 조사하였다. 이를 위해서 HOPG에서 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트와 Cu foil 위에 thermal CVD법으로 합성된 그래핀 나노시트를 각각 SnO₂@graphene 나노구조 성장의 기판으로 사용하였으며, 일반적인 Si 웨이퍼 위에도 동일한 공정으로 SnO₂ 나노구조를 성장시켜서 기판 표면의 효과를 연구하였다.

2. 실험방법

SnO₂@graphene 나노복합소재를 합성하기 위하여 다양한 기판을 준비하였다. 우선 1 cm × 1 cm 또는 2 cm × 2 cm 크기의 Si 웨이퍼(Si/SiO₂(300 nm))를 기판으로 사용하였다. Si 웨이퍼 조각은 아세톤, 에틸 알코올, 탈이온수(DI water) 속에서 각각 5분씩 초음파 세척한 후 고순도(99.999%) 질소가스 gun을 이용하여 건조시켜 준비하였다[7]. 세척된 Si 웨이퍼 조각 위에 스카치 테이프법(scotch-tape method)으로 HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite)로부터 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트를 전사하였다[7,8]. 전사된 그래핀 나노시트의 상태는 광학현미경으로 관찰하였고, 그래핀 나노시트의 층수 및 표면상태는 Raman 분광학으로 분석하였다.

층 제어된 그래핀 나노시트 기판은 열화학기상증착 공정을 이용하여 Cu foil 위에 합성하였다[9]. Cu foil(Alfa Aesar, 99.8%, #13382)을 1 cm × 1 cm 크기로 자른 후, 아세톤, 알코올, 탈이온수 속에서 초음파 세척한 후 고순도 질소가스를 이용하여 건조하였고, 세척된 Cu foil을 thermal CVD의 히터 중앙에 위치시켰다. 로터리 펌프를 구동하여 초기 진공도가 10⁻⁴ Torr 이

하가 되도록 하였고, 고순도(99.999%) 수소가스를 20 sccm (standard cubic centimeters per minute)으로 흘려주며 1시간 동안 1000 °C에 도달하도록 하였다. 이후 메탄가스(CH₄)를 10 sccm으로 흘려주면서 10분간 그래핀 나노시트를 합성하였다. 합성된 그래핀 나노시트 위에 PMMA를 스핀코팅하고, 0.1 M의 APS(Ammonium Persulfate Solution)로 에칭한 후, 세척된 Si 웨이퍼 위에 전사하였다[9]. 전사된 그래핀 나노시트의 상태는 광학현미경으로 관찰하였고, 그래핀 나노시트의 층수 및 표면상태는 Raman 분광학으로 분석하였다.

SnO₂ 나노구조물은 two-zone thermal CVD 장비를 이용하여 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트 및 thermal CVD로 합성된 층 제어된 그래핀 나노시트와 Si 웨이퍼 기판 위에 각각 성장되었다. 이산화주석의 합성조건은 선행연구결과의 조건을 적용하였다[9,10]. 즉 SnO₂ 파우더(99.9%, Sigma Aldrich, #244651)를 알루미늄 도가니에 담아서 히터1의 중앙에 위치시키고, 다양한 기판을 히터2의 중앙에 위치 시켰다. 이후에 로터리 펌프를 구동하여 초기 진공도를 10⁻⁴ Torr 이하로 유지시킨 상태에서 고순도(99.999%) Ar 가스와 산소가스를 각각 1000 sccm, 10 sccm으로 흘려주었고[9], 1시간 동안에 히터1은 1097 °C, 히터2는 424 °C로 온도를 올려 주었다. 이후에 3시간 동안 동일한 상태를 유지하면서 이산화주석 나노구조를 성장시켰다. 이때 CVD 내부의 공정압력은 3.1 Torr로 일정하게 유지하였다[10].

그래핀 나노시트와 Si 웨이퍼 위에 합성된 이산화주석 나노구조의 표면형상을 FE-SEM(FEI, Sirion)으로 분석하였다. 이때 가속전압은 10.0 kV이었고, FE-SEM 분석시 절연체 시료에서 발생하는 차징효과(charging effect)에 의한 이미지 왜곡을 방지하기 위해서 10 nm 두께의 백금(platinum) 박막을 코팅하였다. 그래핀 나노시트의 층수와 표면상태를 SnO₂ 나노구조물 성장 전후에 Raman 분광법으로 분석하였다. 또한 그래핀 나노시트의 표면에 형성된 작용기(functional group) 상태를 분석하기 위하여 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy) 분석을 실시하였다[11].

3. 실험결과 및 고찰

HOPG로부터 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트 위에 SnO₂ 나노구조물이 성장된 시료의 주사전자현미경 분석 이미지를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1 (a)에는 시료

의 전체적인 모습을 나타내었는데, 파란색 박스 영역은 Si 웨이퍼 표면에 성장된 SnO₂ 나노구조를 나타내었고, 붉은색 박스 영역은 기계적으로 HOPG에서 박리된 그래핀 나노시트 위에 성장된 SnO₂ 나노구조를 나타내었다. Fig. 1 (d)의 5만배의 저배율 FE-SEM 이미지에서는 Si 기판 위에서는 아무것도 없는 것처럼 관찰되지만, Fig. 1 (f)처럼 20만배의 고배율 이미지를 살펴보면 미세하지만 nanodots 형태로 SnO₂ 나노구조물이 성장된 것을 확인할 수 있다. 이와는 대조적으로 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트 위에서는 Fig. 1 (b)에서처럼 1만배의 저배율 이미지에에서도 SnO₂ 나노구조물이 고르게 잘 성장된 것을 확인할 수 있다.

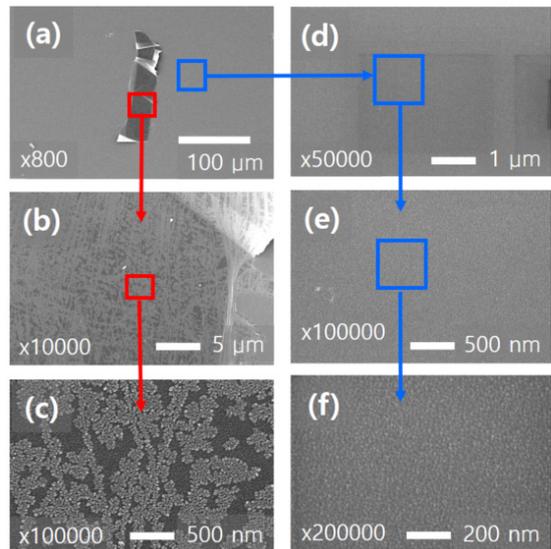


Fig. 1. FE-SEM images of SnO₂ nanostructure on mechanically cleaved graphene nanosheets of HOPG and Si wafer

HOPG로부터 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트의 층수와 표면상태를 Raman 분광학으로 분석한 결과를 Fig. 2 (a)에 나타내었다. 2D peak와 G peak의 상대적인 강도를 비교한 결과, 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트는 다층 그래핀 나노시트인 것을 확인할 수 있다 [10]. Fig. 2 (b)에는 Fig. 1 (d) 영역을 Raman 분광학으로 분석한 결과를 나타내었다. SnO₂의 주요피크는 파수 300, 616 cm⁻¹에서 관찰되어 선행연구에서와 일치하는 결과를 나타내었다[9,10]. 또한 Fig. 1 (f)에 나타난 것처럼 nanodots 형태의 SnO₂ 나노구조가 성장된 것을 확인할 수 있다.

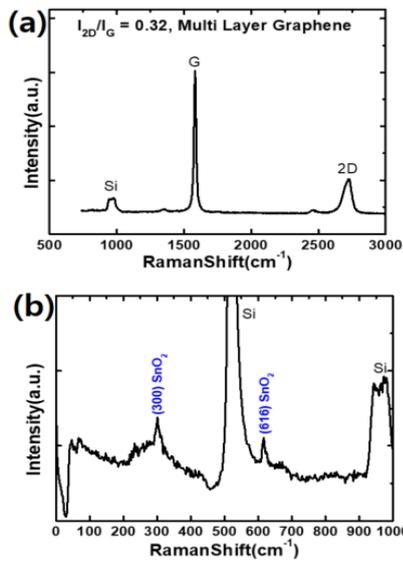


Fig. 2. Raman spectra of (a) mechanically cleaved graphene nanosheets of HOPG, (b) SnO₂ nanostructure on Si wafer

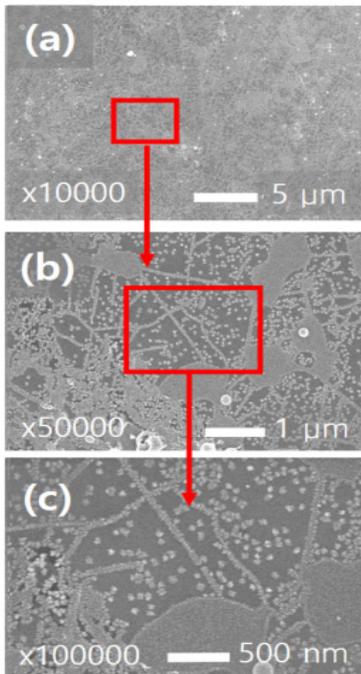


Fig. 3. FE-SEM images of SnO₂ nanostructure on chemically synthesized graphene nanosheets on Cu foil by thermal CVD

thermal CVD를 이용하여 Cu foil 위에 성장된 그래핀 나노시트를 Si 웨이퍼 위에 전사시킨 기판을 이용하여

SnO₂ 나노구조물을 성장시킨 시료의 FE-SEM 분석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 1만배의 저배율 이미지인 Fig. 3 (a)에서도 SnO₂ 나노구조물이 비교적 고르게 잘 성장된 것을 확인할 수 있다. 10만배의 고배율 이미지인 Fig. 1 (c)와 Fig. 3 (c)를 비교해보면, SnO₂ 나노구조물이 성장된 기판은 그래핀 나노시트로 같지만 HOPG로부터 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트 기판과 thermal CVD 공정으로 Cu foil 위에 성장된 그래핀 나노시트 기판에 따라 성장된 SnO₂ 나노구조물의 표면형상이 다른 것을 확인할 수 있다. 그래핀 나노시트의 표면 상태와 functional group 종류에 따라 SnO₂ 나노구조물의 성장에 어떻게 영향을 미치는지를 확인하기 위하여 Raman 분광학 분석과 XPS 분석을 수행하여 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 그 결과를 나타내었다.

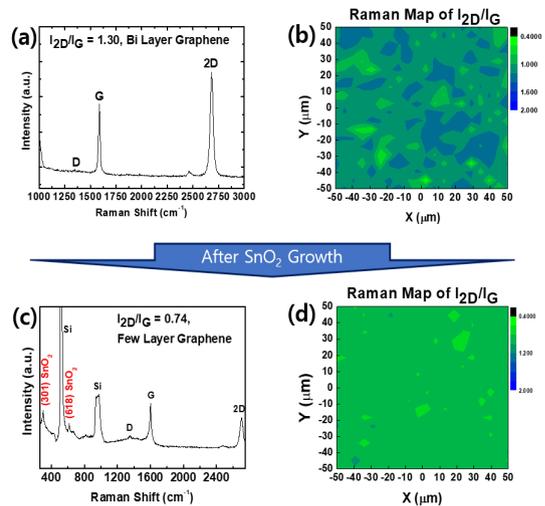


Fig. 4. Raman spectra (a, c) and Raman 2D mapping images (b, d) of SnO₂ nanostructure growth before and after

Fig. 4 (a)에서 볼 수 있는 것처럼, thermal CVD 공정으로 합성된 그래핀 나노시트는 defect가 거의 없는 고품질의 bi-layer 그래핀 나노시트였고[10], Fig. 4 (b)에 확인할 수 있는 것처럼 100 $\mu m \times 100 \mu m$ 영역에서 비교적 균일하게 bi-layer로 잘 성장되었다. Fig. 4 (c)와 (d)에서 볼 수 있는 것처럼, SnO₂ 나노구조물이 성장된 후에 그래핀 나노시트는 few layer graphene nanosheet로 변화였고, 100 $\mu m \times 100 \mu m$ 영역에서 더욱 균일한 두께 분포를 나타내었다. 이것은 SnO₂ 나노구조물을 성장시키기 위하여 그래핀 나노시트 기판을 424 $^{\circ}C$ 로 가열함에 따라 부분적으로 불균일하게 존재하

던 carbon 원자들이 열적으로 활성화되어 bi-layer 그래핀 나노시트에서 few layer 그래핀 나노시트로 특성이 변한 것으로 판단된다. Fig. 3과 Fig. 4 (c)에서 볼 수 있는 것처럼, SnO₂ 나노구조물이 그래핀 나노시트 위에 균일하게 잘 성장된 것을 확인할 수 있다.

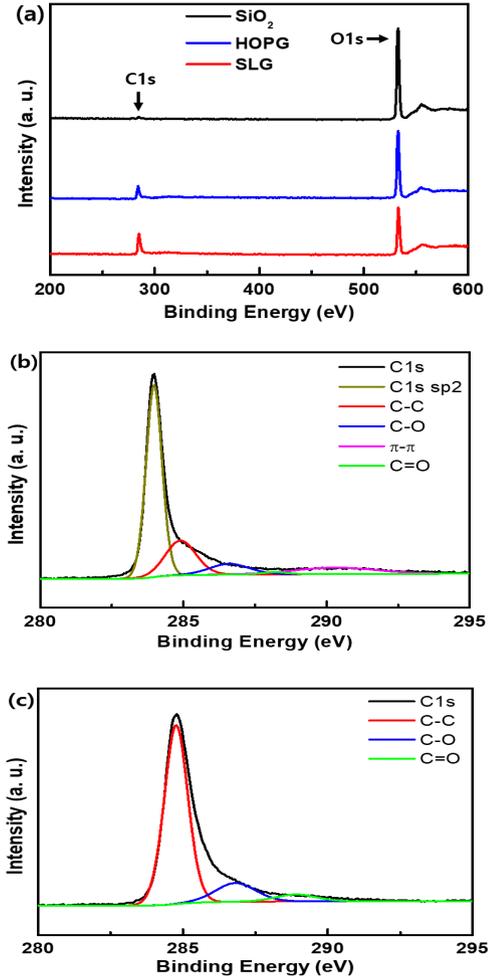


Fig. 5. (a) C 1s and O 1s XPS spectra of Si wafer surface, cleaved graphene nanosheet of HOPG, chemically synthesized graphene nanosheet by thermal CVD, (b) C 1s XPS spectra of cleaved graphene nanosheet of HOPG, (c) C 1s XPS spectra of chemically synthesized graphene nanosheet by thermal CVD

그래핀 나노시트의 표면에 존재하는 functional group의 차이에 따라서 그래핀 나노시트의 surface energy가 각각 다르게 되며, 이러한 특성은 그래핀 나노시트 위에

성장하는 나노구조물의 형태에 영향을 미친다고 알려져 있다[11,12]. 따라서 Si 웨이퍼 표면 및 HOPG로부터 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트와 thermal CVD로 Cu foil 위에 성장된 그래핀 나노시트의 표면상태를 XPS로 분석하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5 (a)를 보면 기판에 따라서 C 1s의 XPS 피크의 크기가 다른 것을 확인할 수 있다. 즉 Si wafer의 표면에서는 C 1s 피크가 거의 관찰되지 않는다. 따라서 Fig. 1 (d,e,f)에서 볼 수 있는 것처럼 SnO₂ 나노구조물의 성장에서 우선 성장 site가 존재하지 않아서 특별한 표면형상을 갖지 않는 것으로 판단된다. 반면에 Fig. 5 (a,b,c)에서 볼 수 있는 것처럼 그래핀 나노시트 표면에서는 C 1s 피크가 관찰되며, 특히 Fig. 5 (b,c)에서처럼 surface functional group을 분석해보면 ether group(C-O)과 carbonyl group(C=O)이 존재한다. 특히 thermal CVD 공정으로 합성된 그래핀 나노시트 표면에서는 Fig. 5 (c)에서 볼 수 있는 것처럼 carbonyl group의 비율이 HOPG에서 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트 표면보다 상대적으로 더 많은 것으로 분석되었다. 이처럼 그래핀 나노시트 표면의 functional group의 차이가 SnO₂ 나노구조물의 성장에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 SnO₂ 나노구조의 성장에서 기판의 표면효과를 조사하였다. 특히 Si 웨이퍼와 HOPG에서 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트 및 thermal CVD 공정으로 Cu foil 위에 합성된 그래핀 나노시트의 functional group이 SnO₂ 나노구조물의 성장에 미치는 영향을 조사하였고, 연구결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 기판 표면에 C 1s XPS 피크가 관찰될 경우, SnO₂ 나노구조의 우선 성장이 촉진되었다. C 1s 피크의 상대적인 세기는 Si/SiO₂ 표면에서는 2287 cps, HOPG에서 박리된 그래핀 표면에서는 31946 cps, CVD로 성장된 그래핀 표면에서는 34442 cps이었다.

둘째, C 1s XPS 피크 중 ether functional group과 carbonyl functional group이 존재하면 SnO₂ 나노구조물의 우선 성장이 활성화 되었다.

셋째, C 1s XPS 피크 중 carbonyl functional group 피크가 클수록 SnO₂ 나노구조물의 우선 성장이 보다 활성화 되었다. carbonyl functional group 피크의 상대적인 세기는 HOPG에서 박리된 그래핀 표면에서

는 383 cps, CVD로 성장된 그래핀 표면에서는 1343 cps이었다.

이상에서 살펴본 것처럼 그래핀 나노시트 위에 존재하는 functional group의 종류에 따라서 SnO₂ 나노구조물의 우선 성장이 영향을 받았으며, 그래핀 나노시트 위에 직접 성장된 SnO₂ 나노구조물은 별도의 추가 공정없이 고감도 가스센서의 감지물질로 적용될 수 있다. 또한 SnO₂@graphene 활물질을 도전재와 첨가제 및 바인더로 slurry를 제조하고, pasting하는 공정없이 리튬이온 전지의 음극소재로 적용할 수 있다. 따라서 SnO₂@graphene 나노복합소재는 고품질의 가스센서 및 고용량의 리튬이온전지 제작에 적용할 수 있을 것으로 전망된다.

References

- [1] L. Mei, Y. Chen, J. Ma, "Gas sensing of SnO₂ nanocrystals revisited: Developing ultra-sensitive sensors for detecting the H₂S leakage of biogas", *Scientific Reports*, Vol. 4, #6028, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep06028>
- [2] S. Maeng, S-W. Kim, D-H. Lee, S-E. Moon, K-C. Kim, A. Maiti, "SnO₂ nanoslab as NO₂ Sensor: Identification of the NO₂ sensing mechanism on a SnO₂ surface", *ACS Applied materials and interfaces*, Vol. 6, pp. 357-363, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1021/am404397f>
- [3] W. Yue, S. Yang, Y. Ren, X. Yang, "In situ growth of Sn, SnO on graphene nanosheets and their application as anode materials for lithium-ion batteries", *Electrochimica Acta*, Vol. 92, pp. 412-420, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2013.01.058>
- [4] Y. Deng, C. Fang, G. Chen, "The development of SnO₂/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>
- [5] D. Zhang, A. Liu, H. Chang, B. Xia, "Room-temperature high-performance acetone gas sensor based on hydrothermal synthesized SnO₂-reduced graphene oxide hybrid composite", *RSC Advances*, Vol. 5, pp. 3016-3022, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1039/c4ra10942b>
- [6] D. Zhang, J. Liu, H. Chang, A. Liu, B. Xia, "Characterization of hybrid composite of SnO₂ nanocrystal-decorated reduced graphene oxide for ppm-level ethanol gas sensing application", *RSC Advances*, Vol. 5, pp. 18666-18672, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1039/c4ra14611e>
- [7] S-A. Oh, K-C. Kim, "Growth of two-dimensional nanostructured VO₂ on graphene nanosheets", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 9, pp. 502-507, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.502>
- [8] F. Schedin, A. K. Geim, S. V. Morozov, E. W. Hill, P. Blake, M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, "Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene", *Nature Materials*, Vol. 6, pp. 652-655, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat1967>
- [9] J-I. Kim, K-C. Kim, "The influence of oxygen gas flow rate on growth of tin dioxide nanostructures", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 19, No. 10, pp. 1-7, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.10.1>
- [10] J-I. Kim, K-C. Kim, "Growth of tin dioxide nanostructures on chemically synthesized graphene nanosheets", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 5, pp. 81-86, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.5.81>
- [11] Y. C. G. Kwan, G. M. Ng, C. H. F. Huan, "Identification of functional groups and determination of carboxyl formation temperature in graphene oxide using the XPS O 1s spectrum", *Thin Solid Films*, Vol. 590, pp. 40-48, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2015.07.051>
- [12] J. Bong, J. H. Park, T. Lim, S. J. Kang, S. K. Kwak, "Contact angle analysis for the prediction of defect states of graphene grafted with functional groups", *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 5, #1800166, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.201800166>

김기출(Ki-Chul Kim)

[종신회원]



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

<관심분야>

에너지 저장 소재, 가스센서, 바이오 응용 소재