

이산화바나듐 나노구조물의 성장에서 그래핀 기판의 영향에 관한 연구

김기출
목원대학교 신소재화학공학과 교수

A Study on the Effect of Graphene Substrate for Growth of Vanadium Dioxide Nanostructures

Ki-Chul Kim

Professor, Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요 약 금속 산화물/그래핀 형태의 복합 나노소재는 높은 전기용량을 갖는 2차 전지의 전극용 소재 또는 고감도 가스 센서의 감지물질 등으로 활용되는 매우 유용한 기능성 소재이다. 본 논문에서는 열 화학기상증착(CVD, Chemical Vapor Deposition)으로 Cu Foil 위에 대면적으로 합성된 CVD 그래핀 및 고정렬 열분해 흑연(HOPG, Highly Oriented Pyrolytic Graphite)으로부터 기계적으로 박리된 그래핀 기판 위에 이산화바나듐(VO_2) 나노구조물을 기상수송방법으로 직접 성장시키는 연구를 수행하였다. 연구결과 CVD 그래핀 기판의 경우, 그래핀 결정 경계에서 상대적으로 많이 존재하는 기능기들이 VO_2 나노구조물에서 핵형성의 씨앗으로 작용하는 것이 확인되었다. 반면에 HOPG에서 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트 표면에는 기능기가 균일하게 분포하기 때문에, 2차원과 3차원 형태로 VO_2 나노구조물이 성장되었다. 이러한 연구결과는 고기능성 VO_2 /그래핀 나노복합소재를 이용하여 높은 전기용량을 갖는 2차 전지 전극소재 및 고감도 가스 센서의 감지물질 합성에 유용하게 활용될 것으로 전망된다.

주제어 : 금속 산화물, 그래핀, 복합 나노소재, 기상수송방법, 이산화바나듐

Abstract The metal oxide/graphene nanocomposites are promising functional materials for high capacitive electrode material of secondary batteries, and high sensitive material of high performance gas sensors. In this study, vanadium dioxide(VO_2) nanostructures were grown on CVD graphene which was synthesized on Cu foil by thermal CVD, and exfoliated graphene which was exfoliated from highly oriented pyrolytic graphite(HOPG) using a vapor transport method. As results, VO_2 nanostructures on CVD graphene were grown preferential growth on abundant functional groups of graphene grain boundaries. The functional groups are served to nucleation site of VO_2 nanostructures. On the other hand, 2D & 3D VO_2 nanostructures were grown on exfoliated graphene due to uniformly distributed functional groups on exfoliated graphene surface. The characteristics of morphology controlled growth of VO_2 /graphene nanocomposites would be applied to fabrication process for high capacitive electrode materials of secondary batteries, and high sensitive materials of gas sensors.

Key Words : Metal Oxide, Graphene, Hybrid Nanomaterials, Vapor Transport Method, Vanadium Dioxide

*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(kckim30@mokwon.ac.kr)

Received August 30, 2018

Revised September 17, 2018

Accepted October 20, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

최근 세계적으로 산업의 고도화와 생활수준의 향상 등으로 인하여 전기에너지의 사용량이 급증하고 있다. 인류가 활용하고 있는 전기에너지의 상당부분은 화석연료를 이용한 화력발전에서 의존하고 있으며, 지구상에 매장되어 있는 화석연료의 양이 제한되어 있기 때문에 화석연료를 대체하여 전기에너지를 생산할 수 있는 신재생에너지원의 개발은 인류생존의 문제와 관련된 매우 중요한 문제이다. 현재까지 개발된 대표적인 신재생에너지원은 태양광 발전과 풍력 발전인데, 이러한 신재생에너지원은 낮에만 전력의 생산이 가능하고, 바람이 있을 때에만 전기를 생산할 수 있는 한계점이 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위해서 전기에너지가 생산될 때 사용되지 않은 전기에너지를 저장할 수 있는 대용량 전력 저장 장치(Energy Storage System, ESS)가 개발되어 활용되고 있다. ESS에 저장된 전력은 밤이나 바람이 없을 때 전력을 공급하는데 이용된다.

ESS에 활용되는 고성능 이차전지의 개발에 있어서 단위체적당 전기에너지를 저장할 수 있는 비 전기용량(Specific Capacity)이 높은 전극소재를 개발하는 것은 매우 중요한 일이다[1,2]. 특히 상용화된 리튬이온 전지의 Anode 소재로 사용되고 있는 흑연(Graphite)의 이론적 전기용량(372 mAh/g)의 한계치에 거의 근접하는 수준으로 현재 리튬이온전지의 제작 기술이 발달함에 따라, 흑연보다 비 전기용량이 높은 전극소재를 개발하는 것이 매우 중요한 연구주제로 부상하였다[1-5]. 최근에 나노구조를 갖는 금속 산화물을 이용하여 높은 비 전기용량을 달성한 연구들이 보고되고 있다. 특히 금속 산화물/그래

핀 복합소재를 활용하여 높은 비 전기용량 및 높은 안정성의 충전/방전 특성을 나타내는 전극소재를 개발하고자 하는 연구가 다양하게 시도되고 있다[1-5].

2차원 평면 구조를 갖는 그래핀 나노시트는 높은 전기전도도, 열전도도, 전하이동도 및 우수한 기계적 강도와 광학적 특성, 플렉시블 특성 등으로 인하여 많은 주목을 받고 있다[6]. 특히 열 화학기상증착(Thermal CVD) 장비를 이용하여 고품질의 그래핀을 대면적으로 합성할 수 있음이 보고되면서[7-9] 그래핀과 관련된 연구는 폭발적으로 증가하였다. 그래핀은 흑연보다 2배나 높은 이론적인 비 전기용량(744 mAh/g)을 갖고 있으며[2], 금속 산화물/그래핀 복합소재는 현재 상용화 되어 있는 흑연과 비교하여 매우 우수한 비 전기용량 특성과 충전/방전 특성을 나타내어 주목을 받고 있다[1-5].

또한 이산화바나듐은 상온에서는 낮은 전기전도도와 높은 광투과율 특성을 나타내는 Monoclinic 결정구조를 갖지만, 68 °C 이상에서는 높은 전기전도도와 낮은 광투과율 특성을 나타내는 Rutile 결정구조로 상전이를 하는 특성을 가지고 있으며, 이차전지의 전극물질 및 가스 센서의 감지소재로 활용될 수 있다[10,11].

본 연구에서는 금속 산화물 반도체인 이산화바나듐 나노구조물을 그래핀 나노시트 위에 직접 성장시키는 연구를 진행하였다. 특히 Thermal CVD를 이용하여 Cu Foil 위에 합성된 CVD 그래핀과 고정렬 열분해 흑연(Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG)에서 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트를 이용하여 그래핀 기반 이산화바나듐 나노구조물의 성장에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

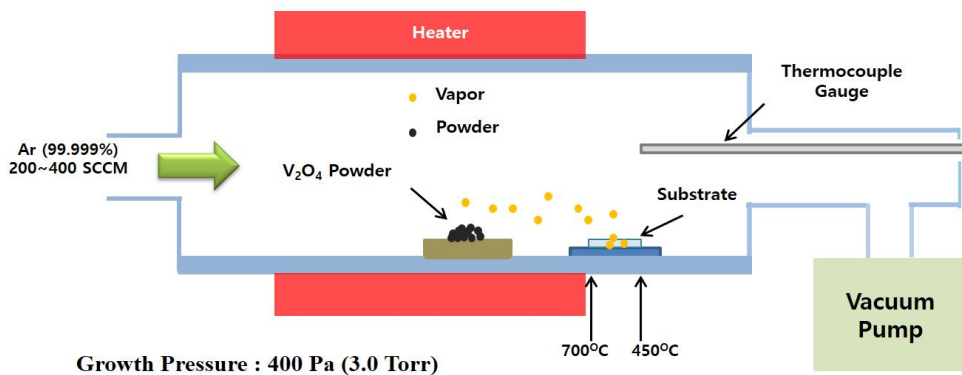


Fig. 1. Schematic illustration of VO_2 nanostructures growth by vapor transport method using a horizontal tube furnace system.

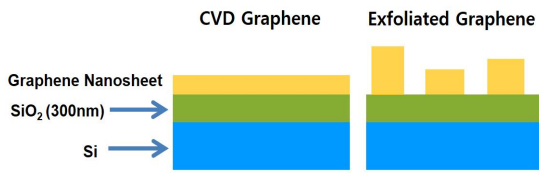


Fig. 2. Substrate configuration for growth of VO₂ nanostructures by vapor transport method . The CVD graphene was synthesized by thermal CVD on Cu foil and transferred on Si wafer. The exfoliated graphene was mechanically exfoliated by 3M Scotch tape from HOPG.

2. 실험방법

Fig. 1에 나타낸 것과 같은 Thermal CVD 시스템을 이용하여 그래핀 나노시트 기판 위에 이산화바나듐 나노구조물을 기상 수송 방법으로 직접 성장시켰다. 이산화바나듐 나노구조물 성장의 기판으로 사용된 그래핀 나노시트는 Cu Foil 위에 메탄과 수소 가스를 이용하여 대면적으로 합성된 CVD 그래핀과[7,8] HOPG(Alfa Aesar, #43834)로부터 3M 스카치 테이프를 이용하여 기계적으로 박리된 그래핀을 사용하였다[6]. CVD 그래핀은 메탄과 수소가스를 15:10(SCCM)으로 혼합한 가스를 흘리면서 1000℃에서 20분 동안 합성하였고, PMMA로 스핀 코팅 후 0.1M의 APS 용액을 이용하여 촉매금속을 에칭한 후 세척된 Si 웨이퍼 조각 위에 전사되었다. 본 연구에서 사용된 CVD 그래핀의 성장조건 및 전사조건은 선행 보고논문에 상세하게 기술되어 있다[12].

이산화바나듐 나노구조물을 그래핀 기판 위에 직접 성장시키기 위하여 Fig. 1에 나타낸 것처럼 그래핀 나노시트 기판을 히터의 중앙으로부터 이격하여 배치시키고, 히터의 중앙에는 순도 99.9%의 바나듐옥사이드 파우더 (Sigma Aldrich, #215821)를 알루미늄 도가니에 2.0g 넣어서 위치시켰다. 로터리 펌프를 이용하여 챔버의 진공도를 5×10^{-4} Torr 이하로 유지시킨 후, 고순도 Ar (99.999%) 가스를 이용하여 3차례 Purging 공정을 수행하였고, 200 ~ 400 SCCM의 고순도 Ar 가스가 흐르는 상태에서 히터를 1000 °C로 가열하여 바나듐옥사이드 파우더를 기상화시켰다. 기판인 그래핀 나노시트의 온도가 700 ~ 450 °C가 되도록 기판 홀더의 위치를 조정하였고, 이산화바나듐이 성장되는 동안의 챔버의 압력은 게이트

밸브를 조절하여 3.0 Torr로 일정하게 유지시켰다. 이때 공정압력은 가스의 종류에 무관하게 진공도를 측정할 수 있는 전기용량형 게이지(Capacitance Manometer)를 이용하여 측정하였다. VO₂ 나노구조물이 성장된 후 히터를 상온으로 냉각시킨 후 광학현미경, 주사전자현미경 분석을 통하여 성장된 VO₂ 나노구조물의 Morphology 특성을 분석하였고, Raman 분광학 분석을 통하여 그래핀 나노시트의 품질 및 VO₂ 나노구조물의 결정학적 특성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

이산화바나듐 나노구조물의 성장 기판으로 사용된 그래핀 나노시트는 CVD 그래핀의 경우, Fig. 2의 왼쪽 그림과 같이 고품질의 단일층 그래핀이 기판 전체영역에 걸쳐 일정하게 분포하고 있으며, HOPG로부터 기계적으로 박리된 그래핀은 Fig. 2의 오른쪽 그림과 같이 Si 기판 위에 부분적으로 위치하고 있고, 그래핀 나노시트의 두께도 위치에 따라 각각 다른 두께를 갖고 있다. VO₂ 나노구조물의 성장 전후의 그래핀 기판의 광학현미경 이미지를 Fig. 3에 나타내었다. CVD 그래핀의 경우, Fig. 3 (a)에 나타낸 것처럼 성장 전후에 색깔의 변화는 관찰되었으나, 특정한 형상을 관찰할 수는 없었다. 하지만 HOPG에서 기계적으로 박리된 그래핀의 경우, VO₂ 나노구조물이 성장되기 전에는 불규칙한 모양의 그래핀 나노시트가 부분적으로 위치하고 있는 것이 Fig. 3(b)의 왼쪽 이미지와 같이 관찰되었고, 이산화바나듐 성장실험 후에는 Fig. 3(b)의 오른쪽 이미지처럼 그래핀 나노시트 이외에도 Si 기판 위에 다양한 크기의 나노와이어가 성장된 모습이 관찰되었다. 광학현미경 이미지를 나타낸 Fig. 3에서 이산화바나듐 나노구조물의 성장조건은 기판 온도 650 °C, 공정압력 3.0 Torr(400 Pa), Ar Gas Flow Rate 200 SCCM, 성장시간 3 시간으로 동일하였고, VO₂ 나노구조물이 성장되는 그래핀 기판의 종류만 CVD 그래핀과 HOPG에서 박리된 그래핀이 전사된 기판으로 다르게 실험이 진행되었다. Fig. 3 (b)의 오른쪽 이미지에서 볼 수 있는 것처럼, Si 기판 위에 VO₂ 나노와이어가 성장된 결과는 세계 최초로 단결정 VO₂ 나노와이어의 합성을 보고한 하버드 대학의 박홍근 교수 그룹의 연구결과와 부합하는 결과이며[13], Si 기판뿐만 아니라 Quartz, Sapphire 기판 등 다양한 기판 위에서 저압조건에서 기상수송법으

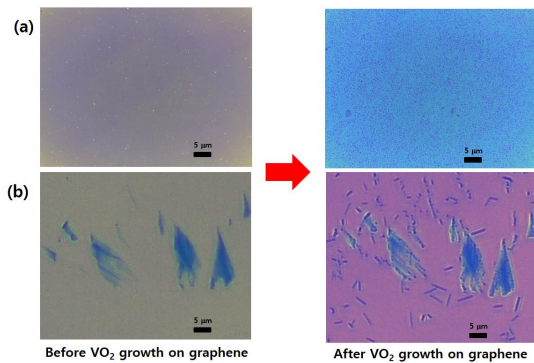


Fig. 3. Optical microscope image of graphene substrate and as grown VO₂ nanostructures on (a) CVD graphene/SiO₂(300 nm)/Si, and (b) exfoliated graphene/SiO₂(300 nm)/Si substrate.

로 정사각형의 단면구조를 갖는 VO₂ 나노와이어가 성장됨을 보고한 선행 연구결과와 부합하는 결과이다[13,14].

VO₂ 나노구조물의 보다 상세한 Morphology 특성을 조사하기 위하여 주사전자현미경 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4 (a), (b)는 CVD 그래핀 기판 위에 이산화바나듐 나노구조물을 성장시킨 후, 주사전자현미경으로 분석한 이미지이며, Fig. 4 (c), (d)는 HOPG에서 기계적으로 박리된 그래핀이 전사된 그래핀 기판 위에 이산화바나듐 나노구조물을 성장시킨 후 주사전자현미경으로 분석한 이미지이다. 이때 각각 다른 그래핀 기판에 대한 이산화바나듐의 성장 조건은, 기판 온도 650 °C, 공정압력 3.0 Torr(400 Pa), Ar Gas Flow Rate 200 SCCM으로 동일하고, VO₂ 나노구조물의 성장 시간은 CVD 그래핀 기판의 경우에는 3시간, HOPG에서 박리된 그래핀 기판의 경우에는 5시간으로 다르게 성장되었다.

Fig. 4 (a), (b)에서 볼 수 있는 것처럼, CVD 그래핀 기판 위에서 VO₂ 나노구조물은 기판 전체 영역에 대하여 거의 균일한 형태로 그물모양의 성장을 하였다. 주목할 점은 VO₂ 나노구조물이 그래핀 결정의 경계에서 우선적으로 성장한 다음 나머지 영역으로 확장되어가는 형태로 성장되었다는 것이다. 이것은 CVD 공정으로 Cu Foil 위에 그래핀이 성장될 때, 특정 위치에서 Nucleation이 시작되고 그래핀 결정이 확장되면서 그래핀 결정과 그래핀 결정이 이어지는 형태로 단일층 그래핀이 형성되며 [15,16], 이때 그래핀 결정 경계에는 다양한 기능기들이

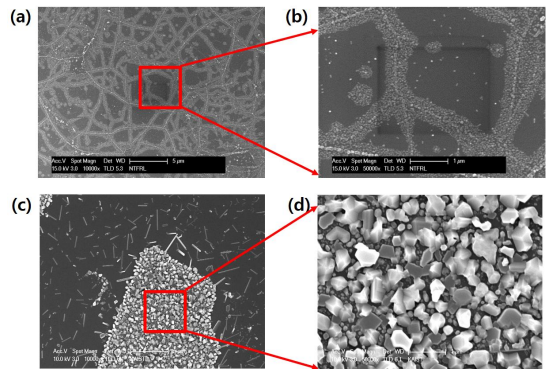


Fig. 4. FE-SEM image of as grown VO₂ nanostructures on (a) & (b) CVD graphene/SiO₂(300 nm)/Si, (c) & (d) exfoliated graphene/SiO₂(300 nm)/Si substrate.

미결합 상태로 존재하게 되는데, 이러한 기능기들이 VO₂ 나노구조물의 핵형성 씨앗으로 작용한 것으로 판단된다 [2,15,16].

Fig. 4 (c), (d)는 HOPG에서 기계적으로 박리된 그래핀이 전사된 Si 기판 위에 VO₂ 나노구조물을 성장시킨 후, 주사전자현미경으로 분석한 이미지이다. Fig. 4(c)에서 볼 수 있는 것처럼, Si 기판 위에서는 정사각형의 단면구조를 갖는 VO₂ 나노와이어가 성장되었고[13], 박리된 그래핀 위에서는 2차원과 3차원(2D & 3D)의 VO₂ 나노구조물이 성장되었다[14]. 박리된 그래핀 위에서 2D & 3D의 VO₂ 나노구조물이 성장된 것은 그래핀 나노시트 위에 분포하고 있는 Carboxyl 또는 Hydroxyl과 같은 기능기들(Functional Groups)이 VO₂ 나노구조물의 핵형성 씨앗으로 작용하여 Vapor-Liquid-Solidification(VLS) 과정으로 2D VO₂ 나노구조물을 성장시키고, Vapor-olidification(VS) 과정으로 3D VO₂ 나노구조물을 형성시킨 것으로 판단된다[2]. 반면에 Si 기판 위에서는 그래핀 표면이 갖고 있는 기능기들이 없으므로 상대적으로 더디게 선행연구자들이 보고한 바와 같이 VLS 과정으로 VO₂ 나노와이어가 성장된 것으로 판단된다[13].

그래핀 나노시트라고 하더라도 CVD 공정으로 합성된 그래핀 기판과 HOPG에서 박리된 그래핀 기판은 표면에 가지고 있는 관능기의 분포 상태가 다르고, 이러한 표면 상태의 차이가 Fig. 4 (a) & (c)에서 볼 수 있는 것처럼 전혀 다른 형태의 VO₂ 나노구조물을 성장시키는 결과로 나타났다. Fig. 4(c)의 그래핀 나노시트는 Raman 분석결

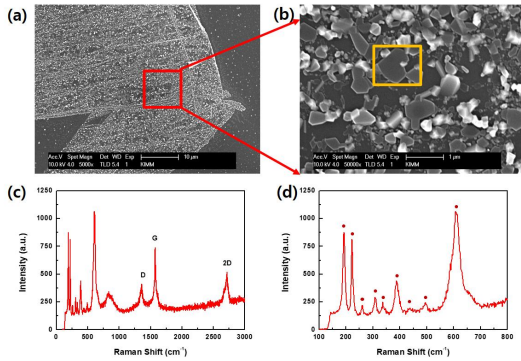


Fig. 5. (a) & (b) FE-SEM image of as grown VO_2 nanostructures on exfoliated graphene/ SiO_2 (300 nm)/Si substrate. (c) & (d) Raman spectra of as grown VO_2 nanostructures on exfoliated graphene for yellow boxed area of Fig. 5 (b).

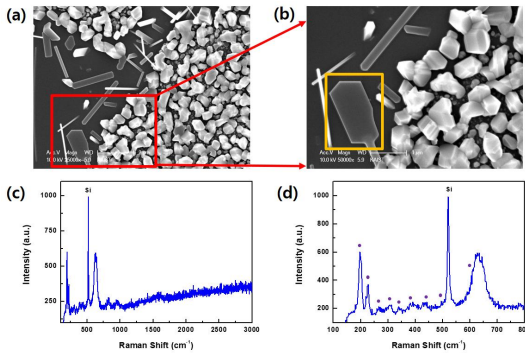


Fig. 6. (a) & (b) FE-SEM image of as grown VO_2 nanostructures on exfoliated graphene/ SiO_2 (300 nm)/Si substrate. (c) & (d) Raman spectra of as grown VO_2 nanostructures on exfoliated graphene for yellow boxed area of Fig. 6 (b).

과 5층 이상의 다층 그래핀 나노시트로 분석되었으며, VO_2 나노구조물의 성장 형태를 참고하면 그래핀 나노시트의 표면은 거의 단결정 형태를 갖고 있는 것으로 판단된다.

그래핀 기판 위에 성장된 VO_2 나노구조물의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 Raman 분광학 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 5 & Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에서 VO_2 나노구조물의 성장조건은 성장온도 $650\text{ }^\circ\text{C}$, 공정압력 3.0 Torr(400 Pa), Ar Gas Flow Rate 400 SCCM, 성장시간 3시간의 조건이었으며, Fig. 6에서 VO_2 나노구조물의 성장조건은 성장온도 $700\text{ }^\circ\text{C}$, 공정압력 3.0

Torr(400 Pa), Ar Gas Flow Rate 200 SCCM, 성장시간 5시간의 조건이었다. Fig. 4 (c)와 Fig. 5 (a)를 비교해보면 HOPG로부터 박리한 그래핀 나노시트일라도 그래핀의 표면 상태가 다르면 VO_2 나노구조물의 성장형태가 다른 것을 확인할 수 있다. 즉 Fig. 5(a)에서처럼 그래핀 나노시트 위에 그래핀 결정의 경계가 있으면 VO_2 나노구조물이 우선 성장하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 (c) & (d)와 Fig. 6 (c) & (d)에 Fig. 5 & 6 (b)에서 노란색 네모로 표시한 영역에 대한 Raman 분광학 분석결과를 나타내었다. Fig. 5 & 6 (d)에 나타난 것처럼 VO_2 Monoclinic 상에서 나타나는 Raman 분광학 특성 피크들($191, 225, 258, 310, 341, 389, 445, 500, 615\text{ cm}^{-1}$)이 관찰되었다[17]. 또한 분석 영역에 따라서 그래핀 나노시트의 Raman 특성 피크와 Si 기판의 Raman 특성 피크가 관찰되었다[7,8].

4. 결론

본 논문에서는 기상수송법으로 그래핀 기판 위에 이산화바나듐 나노구조물을 직접 성장시켰다. 성장된 VO_2 나노구조물의 Morphology와 결정학적 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. Si 기판 위에서는 1차원의 VO_2 나노와이어가 성장되었고, 그래핀 위에서는 2D & 3D VO_2 나노구조물이 성장되었다.
2. CVD 그래핀 위에서 VO_2 나노구조물은 그래핀 결정의 경계부분에서 우선 성장하였다.
3. HOPG에서 박리된 그래핀의 경우, 표면 상태에 따라서 VO_2 나노구조물이 성장하는 형태에 다소 차이가 있었다. 즉 그래핀 표면에 기능기가 많을수록 VO_2 나노구조물은 우선 성장하는 경향을 나타내었다. 이러한 VO_2 나노구조물의 성장 특성은 VO_2 /그래핀 복합소재를 활용하여 높은 비 전기용량 특성을 갖는 2차 전지의 전극물질 또는 고감도 가스센서의 감지물질의 제조 공정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

[1] G. H. Jeong, S. Baek, S. Lee & S. W. Kim (2016). Metal

- Oxide/Graphene Composites for Supercapacitive Electrode Materials. *Chemistry an Asian Journal*, 11, 949-964.
DOI : 10.1002/asia.2015010172
- [2] Y. Deng, C. Fang & G. Chen. (2016). The Development of SnO₂/graphene Nanocomposites as Anode Materials for High Performance Lithium Ion Batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 304, 81-101.
DOI : 10.1126/science.1252268
- [3] G. M. Thorat, H. S. Jadhav, W. J. Chung & J. G. Seo. (2018). Collective use of Deep Eutectic Solvent for One-pot Synthesis of Ternary Sn/SnO₂@C Electrode for Supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, 732, 694-704.
DOI : 10.1016/j.jallcom.2017.10.176
- [4] X. Wang, et al. (2012). N-Doped Graphene-SnO₂ Sandwich Paper for High-Performance Lithium-Ion Batteries. *Advanced Functional Materials* 22, 2682-2690.
DOI : 10.1002/adfm.201103110
- [5] Y. Yang, et al. (2018). Phosphorized SnO₂/graphene Heterostructures for Highly Reversible Lithium-ion Storage with Enhanced Pseudocapacitance. *Journal of Materials Chemistry A*, 6, 3479-3487.
DOI : 10.1039/c7ta10435a
- [6] K. S. Novoselov, et al. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306, 666-669.
DOI : 10.1126/science.1102896
- [7] K. S. Kim, et al. (2009). Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 457, 706-710.
DOI : 10.1038/nature07719
- [8] X. Li, et al. (2009). Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils. *Science*, 324, 1312-1314.
DOI : 10.1126/science.1171245
- [9] J. H. Lee, et al. (2014). Wafer-Scale Growth of Single-Crystal Monolayer Graphene on Reusable Hydrogen-Terminated Germanium. *Science*, 344, 286-289.
DOI : 10.1126/science.1252268
- [10] W. Wang, B. Jiang, L. Hu, Z. Lin, J. Hou & S. Jiao. (2014). Single Crystalline VO₂ Nanosheets: A Cathode Material for Sodium-ion Batteries with High Rate Cycling Performance. *Journal of Power Sources*, 250, 181-187.
DOI : 10.1016/j.jpowsour.2013.11.016
- [11] E. Strelcov, Y. Lilach & A. Kolmakov. (2009). Gas Sensor Baded on Metal-Insulator Transition in VO₂ Nanowire Thermistor. *Nano Letters*, 9(6), 2322-2326.
DOI : 10.1021/nl900676n
- [12] J. S. Choi, et al. (2016). Facile Fabrication of Properties-controllable Graphene Sheet. *Scientific Reports*, 6, 24525.
DOI : 10.1038/srep24525
- [13] B. S. Guiton, Q. Gu, A. L. Prieo, M. S. Gudiksen & H. Park. (2005). Single-Crystalline Vanadium Dioxide Nanowires with Rectangular Cross Sections. *Journal of the American Chemical Society*, 127, 498-499.
DOI : 10.1021/ja045976g
- [14] S. A. Oh & K. C. Kim. (2016). Growth of Two-dimensional Nanostructured VO₂ on Graphene Nanosheets. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 17(9), 502-507.
DOI : 10.5762/KAIS.2016.17.9.502
- [15] H. Wang, et al. (2012). Controllable Synthesis of Submillimeter Single-Crystal Monolayer Graphene Domains on Copper Foils by Suppressing Nucleation. *Journal of the American Chemical Society*, 134, 3627-3630.
DOI : 10.1021/ja2105976
- [16] Z. Yan, et al. (2012). Toward the Synthesis of Wafer-Scale Single-Crystal Graphene on Copper Foils. *ACS Nano*, 6(10), 9110-9117.
DOI : 10.1021/nn303352k
- [17] G. I. Petrov & V. V. Yakovlev. (2002). Raman Microscopy Analysis of Phase Transformation Mechanism in Vanadium Dioxide. *Applied Physics Letters*, 81, 1023-1025.
DOI : 10.1063/1.1496506

김기출(Ki-Chul Kim)

[정회원]



- 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 신소재화학공학 교수
- 관심분야 : 기능성 나노소재, 기능성 박막, 가스센서, 에너지 관련 소재
- E-Mail : kckim30@mokwon.ac.kr