Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 24, No. 12 pp. 446-451, 2023

https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.12.446
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

RF 마그네트론 스퍼터링 공정을 이용한 3차원 V_2O_5@Mo 나노구조물의 제작

이민규, 김기출*
목원대학교 지능정보융합학과

Fabrication of 3D V_2O_5@Mo Nanostructures Using RF Magnetron Sputtering Process

Min-Gyu Lee, Ki-Chul Kim*
Department of Intelligent Information Convergence, Mokwon University

요 약 오산화 바나듐은 층상 구조를 갖고 있고, 높은 이론적 전기용량을 갖고 있기 때문에 리튬이온배터리의 양극 물질로 많은 주목을 받고 있는 물질 중의 하나이다. 또한 광물자원이 풍부한 저가의 소재이다. 본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 공정을 이용하여 SiO_2(300 nm)/Si 기판 위에 3D V_2O_5 나노구조물과 3D V_2O_5@Mo 나노구조물을 증착하였다. 3D V_2O_5 나노구조물과 3D V_2O_5@Mo 나노구조물의 표면형상은 전계방출 주사전자현미경(FE-SEM)으로 분석하였고, 결정학적 특성은 X선 회절법(XRD)과 Raman 분광학으로 조사하였다. 분석 결과, RF 마그네트론 스퍼터링 공정조건을 제어하여 3D V_2O_5 나노구조물의 형상을 유지하면서 금속 Mo 박막이 얇게 코팅되는 3D V_2O_5@Mo 나노구조물의 제작 조건을 확보하였다. 이러한 3D V_2O_5@Mo 나노구조물을 리튬이온배터리의 양극소재로 적용한다면 2D V_2O_5 양극 소재보다 우수한 성능의 리튬이온배터리의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract Vanadium pentoxide is one of the cathode materials given much attention due to its layered structure and high theoretical capacity. It is also abundant and has a low price. In this study, 3D V_2O_5 nanostructures and 3D V_2O_5@Mo nanostructures were deposited on SiO_2 (300 nm)/Si substrates using RF magnetron sputtering. The surface morphology of 3D V_2O_5 nanostructures and 3D V_2O_5@Mo nanostructures was analyzed by a field emission scanning electron microscope (FE-SEM). Crystallographical characteristics of sputtered 3D nanostructures were investigated by X-ray Diffraction (XRD) and Raman spectroscopy. Fabrication conditions of 3D V_2O_5@Mo nanostructures were secured for conformal coating with Mo thin film on 3D V_2O_5 nanostructures via processing-condition control of RF magnetron sputtering. 3D V_2O_5@Mo nanostructures could be applied to cathode materials of a lithium ion battery. It will be possible to develop a lithium ion battery with higher performance than 2D V_2O_5 cathode materials.

Keywords : All Solid State Battery, Three Dimensional Nanostructure, Lithium Ion Battery, Sputtering Process, Vanadium Oxide

1. 서론

1991년 일본의 SONY에 의해 상용화된 리튬이온배터리(lithium ion battery)는 고에너지 밀도와 장수명의 특징으로 인해 스마트폰이나 노트북과 같은 소형 전자기기에 널리 사용되고 있다. 최근에는 전기자동차(electric vehicle), 하이브리드 자동차(hybrid electric vehicle) 및 에너지 저장 장치(energy storage system)

*Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon University)
email: kckim30@mowkon.ac.kr
Received October 10, 2023 Revised November 2, 2023
Accepted December 8, 2023 Published December 31, 2023

에도 사용되고 있으며, 더 높은 에너지 밀도와 높은 출력 및 높은 안전성을 요구받고 있다[1,2]. 현재 사용되고 있는 상용 리튬이온배터리는 가연성의 유기 용매인 액체 전해질을 사용하고 있기 때문에 과충전 또는 단락으로 인한 열폭주 발생 시에 전극과 전해질의 분해반응이 일어나 배터리 화재가 발생하는 위험이 있다[1,2]. 배터리의 안전성을 개선하기 위해서는 액체 전해질이 아닌 고체 상태의 전해질을 사용하는 전고체 배터리(all solid state battery)의 개발이 필요하다. 고체 전해질 기반의 전고체 배터리는 우수한 안전성과 높은 에너지 밀도, 빠른 충·방전이 가능하다는 장점으로 인해 최근 활발하게 연구되고 있다[2,3]. 또한 전고체 배터리는 양극 물질(cathode material)과 음극 물질(anode material), 전해질(electrolyte)을 적층하여 간단하게 배터리를 제작할 수 있다는 장점이 있다[3]. 전고체 배터리를 제작할 때, 배터리를 어떤 형태로 제작하는지에 따라 에너지 밀도(energy density)와 출력 밀도(power density)가 달라진다[4,5]. Fig. 1의 오른쪽 아래 그림과 같이 얇은 박막의 형태로 배터리를 제작하면 출력 밀도를 높일 수 있어 빠른 충·방전이 가능하지만, 활물질의 양이 적어 에너지 밀도가 낮아지게 되고, Fig. 1의 왼쪽 위쪽에 나타낸 그림처럼 두꺼운 박막의 형태로 배터리를 제작하면 활물질의 양이 증가되어 에너지 밀도를 높일 수 있지만 출력 밀도가 낮아져 빠른 충·방전이 어려워진다. 이와 같이 2차원 구조로 박막을 적층하여 배터리를 제작하면 높은 출력 밀도와 높은 에너지 밀도 두 가지 장점을 모두 구현하기 어려워진다. 하지만 Fig. 1의 오른쪽 위쪽에 나타낸 그림처럼 2차원 구조가 아닌 3차원 구조로 배터리를 제작하면 높은 출력 밀도와 높은 에너지 밀도를 갖는 배터리를 제작할 수 있다. 하지만 이러한 3차원 박막형 배터리를 제작하기 위해서는 포토리쏘그라피(photolithography), 플라즈마 에칭(plasma etching), 원자층증착(atomic layer deposition)과 같은 고가의 반도체 장비를 사용해야 하며, 공정시간이 매우 길기 때문에 배터리 제작 단가가 높아지며, 대면적으로 제작하는데에도 한계가 있다.

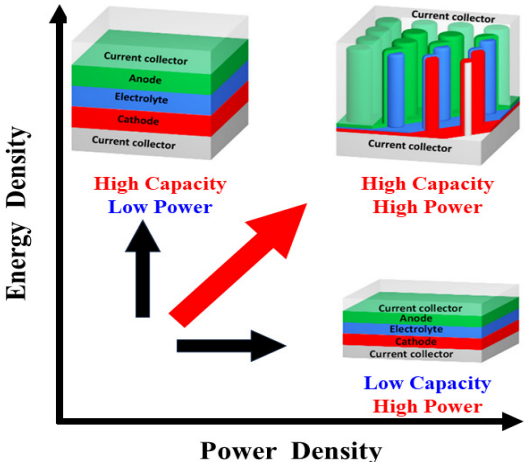

Fig. 1. Relationship of energy density and power density depending on battery types[4,5].

오산화 바나듐(V_2O_5: vanadium pentoxide, 이하 V_2O_5)은 층상 구조를 가지고 있어서 가역적인 리튬 이온의 삽입/추출(intercalation/de-intercalation)이 가능하며 최대 441 mAh/g의 높은 이론적 전기용량을 갖고 있기 때문에 리튬이온배터리나 전고체 배터리의 양극 물질로 많이 연구되고 있는 물질 중 하나이다[2,6,7]. 또한 리튬 코발트 산화물($LiCoO_2$)과 같은 상용 리튬이온배터의 양극재와 비교하여 광물자원이 풍부하여 저렴하다는 장점이 있다. 그러나 V_2O_5는 방전 시 일어나는 비가역적인 상전이(phase transition)와 낮은 전기전도도 등 양극 물질로서 극복해야 할 문제들이 있다[6-8]. 이러한 문제들을 해결하기 위한 방법으로는 다양한 금속 소재의 도핑(doping), 코팅(coating) 등이 제시되고 있다[6,9,10]. 특히 Li-Qiang Mai 등은 몰리브덴(Mo)이 1 mol% 도핑 된 바나듐 산화물이 몰리브덴이 도핑 되지 않은 바나듐 산화물보다 우수한 전기화학적 성능을 갖는 것을 보고하였다[10].

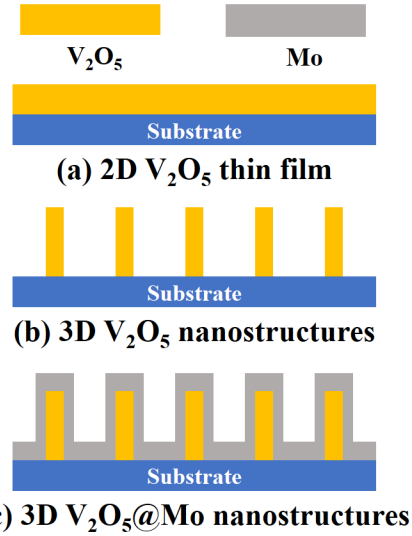

Fig. 2. Schematic diagram of (a) 2D V_2O_5 thin film, (b) 3D V_2O_5 nanostructures and (c) 3D V_2O_5 @Mo nanostructures.

본 연구에서는 Fig. 2의 (a), (b)에 나타낸 것처럼 RF 마그네트론 스퍼터링 공정으로 2차원 형태의 V_2O_5 박막 및 3D V_2O_5 나노구조물을 기판 위에 직접 증착한 저자의 선행연구[11]를 참고하여, Fig. 2(c)와 같은 3D V_2O_5@Mo 나노구조물을 증착하였다. 이러한 공정은 Fig. 1의 오른쪽 위쪽에 나타낸 그림과 같은 3차원 박막형 배터리를 간편하게 구현할 수 있는 공정이며, 포토리쏘그라피, 플라즈마 에칭, 원자층증착과 같은 고가의 장비와 오랜 공정시간을 필요로 하는 공정을 사용하지 않는 저가의 공정일 뿐만 아니라, 대면적으로 3D 박막형 나노구조물을 구현할 수 있는 공정이다. 이러한 공정으로 제작된 3D V_2O_5@Mo 나노구조물은 위에서 기술한 것과 같이 V_2O_5 박막의 낮은 전기전도도 문제를 해결할 수 있다.

2. 실험방법

3D V_2O_5 나노구조물과 3D V_2O_5 나노구조물 위에 금속 몰리브덴(Mo)이 코팅된 3D V_2O_5@Mo 나노구조물은 저자의 선행 연구를 바탕으로 RF 마그네트론 스퍼터링 공정을 이용하여 제작하였다[11]. 실험에는 vanadium 타겟(지름 2인치, 순도 99.96 %, Kurt J. Lesker)과 molybdenum 타겟(지름 3인치, 순도 99.9 %, Kurt J. Lesker)이 사용되었고, 기판과 타겟과의 거리는 100 mm로 일정하게 유지하였다. 증착에 사용한 SiO_2(300 nm)/Si(001) 기판은 아세톤, 에탄올, 탈이온수 속에서 초음파 세척한 뒤, 질소 가스 gun으로 건조하였다. 증착 전, 스퍼터 시스템의 초기 진공도는 터보 분자 펌프(turbo molecular pump)를 이용하여 5.0 x 10^{-7} Torr 이하로 유지하였고, 기판의 온도는 히터를 이용하여 제어하였다. 증착 공정에 사용된 가스는 질량 유량 제어기(mass flow controller)를 이용하여 고순도 아르곤 가스(Ar, 순도 99.999 %)와 고순도 산소 가스(O_2, 순도 99.999 %)를 흘려주었다. 공정 압력은 게이트 밸브(gate valve)를 조절하여 제어하였다.

3D V_2O_5 나노구조물의 증착 조건은 다음과 같다. 즉 기판의 온도는 히터를 이용하여 200 ℃로 유지하였고, Ar 97 SCCM(Standard Cubic Cetimeter per Minute, 이하 SCCM)과 O_2 3 SCCM을 흘려주어 O_2 분압을 3 Vol%로 조절하였으며, 공정 압력은 3 mTorr, RF power는 200 watt에서 증착하였다. 3D V_2O_5@Mo 나노구조물은 3D V_2O_5 나노구조물을 증착 한 이후에, 충분한 시간 동안 기판을 상온까지 냉각한 후에 molybdenum 타겟을 이용하여 증착하였다. Mo 박막은 모든 조건이 동일한 상태에서 Mo 박막을 증착하는 RF power만 2가지 조건으로 다르게 증착하였다. 즉 Mo 박막을 증착하는 RF power만 40 watt, 100 watt로 조절하였다. 3D V_2O_5@Mo(40 W, 100 W) 나노구조물을 제작하기 위해서 공정가스 Ar을 100 SCCM으로 흘려주었고, 공정 압력은 3 mTorr로 조절하였으며, RF power 40 watt, 100 watt에서 각각 증착하였다.

RF 마그네트론 스퍼터링 공정으로 SiO_2/Si 기판 위에 증착된 3D V_2O_5 나노구조물 및 3D V_2O_5@Mo(40 W, 100 W) 나노구조물의 표면형상은 전계방출 주사형 전자현미경(FE-SEM, Field Emission Scanning Electron Microscope, 이하 FE-SEM)을 이용하여 분석하였고, 결정학적 특성은 X선 회절(XRD: X-Ray Diffraction, 이하 XRD) 분석과 Raman 분광학(spectroscopy)으로 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3D V_2O_5 나노구조물과 3D V_2O_5@Mo(40 W, 100 W) 나노구조물의 표면 형상을 확인하기 위하여 FE-SEM 분석을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (a)를 보면 증착된 바나듐 옥사이드 박막은 2D 구조의 얇고 편평한 박막이 아닌 3D V_2O_5 나노구조물로 증착되었으며, 특히 대면적으로 균일하게 증착된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 (b)와 (c)는 각각 3D V_2O_5@Mo(40 W) 나노구조물과 3D V_2O_5@Mo(100 W) 나노구조물의 표면을 FE-SEM으로 분석한 이미지이다. 3D V_2O_5 나노구조물 위에 Mo을 증착하였는데 RF power가 40 watt일 때와(Fig. 3의 (b)) 100 watt일 때(Fig. 3의 (c))의 나노구조물의 형태가 다른 것을 확인할 수 있다. Mo 증착을 위한 RF power가 40 watt일 때에는 기판 위에 형성된 3D V_2O_5 나노구조물의 형태가 유지되는 형태로 Mo 박막 층이 증착된 모습이었다. 반면에 Mo 증착을 위한 RF power가 100 watt일 때에는 기판 위에 미리 증착되어 있었던 3D V_2O_5 나노구조물의 형태가 관찰되지 않고 울퉁불퉁한 모양의 3D V_2O_5@Mo 나노구조물이 증착된 것으로 관찰되었다.

세척된 SiO_2/Si 기판 위에 아무것도 증착되지 않은 상태로 Mo 금속 박막을 RF power 40 watt와 100 watt로 각각 스퍼터링 하였을 때에는 기판 위에 2D 박막 형

태의 Mo 박막이 균일하게 증착되었고, RF power에 따른 증착률 차이에 의해서 두께만 다르게 분석되었다. 따라서 기판 위에 미리 증착된 3D V_2O_5 나노구조물의 형상대로 Mo 박막이 비교적 얇게 증착되는 컨포멀 코팅(conformal coating)은 RF power가 40 watt 조건에서 가능함을 확인할 수 있다.

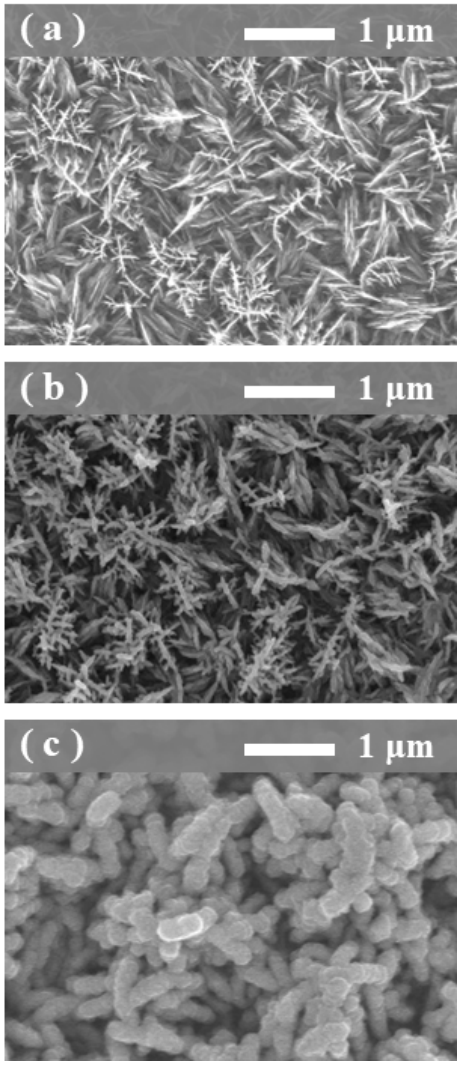

Fig. 3. FE-SEM images(top view) of (a) 3D V_2O_5 nanostructures (b) 3D V_2O_5@Mo(40 W) nanostructures, and (c) 3D V_2O_5@Mo(100 W) nanostructures.

각각 다른 조건으로 스퍼터링 된 박막의 결정성을 분석하기 위하여 XRD 분석과 Raman spectroscopy 분석을 실시하였고, XRD 분석 결과는 Fig. 4에 나타내었고, Raman 분석 결과는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4의 XRD 분석 결과에서 3D V_2O_5 나노구조물은 빨간색 실선으로, 3D V_2O_5@Mo(40 W) 나노구조물은 파란색 실선으로, 그리고 3D V_2O_5@Mo(100 W) 나노구조물은 검은색 실선으로 표시하였다. XRD pattern에서 V_2O_5 결정상의 XRD peak는 빨간색 채워진 원(solid circle)으로 표시하였고, Mo의 XRD peak는 파란색 채워진 원으로 표시하였다. 3D V_2O_5 시료와 3D V_2O_5@Mo(40 W) 시료에서는 V_2O_5 결정상이 뚜렷하게 관찰되었다[12]. 이를 통하여 V_2O_5 결정상이 잘 증착된 것을 알 수 있다. 또한 3D V_2O_5@Mo(40 W) 나노구조물의 XRD 분석 결과에서 V_2O_5의 XRD peak 이외에 Mo의 XRD peak가 관찰된 것으로 보아 V_2O_5와 Mo이 잘 증착된 것을 확인할 수 있다[13]. 반면에 3D V_2O_5@Mo(100 W) 나노구조물의 XRD 분석 결과에서는 V_2O_5의 XRD peak은 잘 관찰되지 않고 Mo의 XRD peak만 관찰되었다. 이것은 3D V_2O_5@Mo(100 W) 나노구조물의 경우 3D V_2O_5 나노구조물 위에 Mo 층이 너무 두껍게 증착되어 XRD 분석의 skin depth가 표면의 Mo 박막층에 한정되었기에 V_2O_5 결정상이 관찰되지 않은 것으로 판단된다.

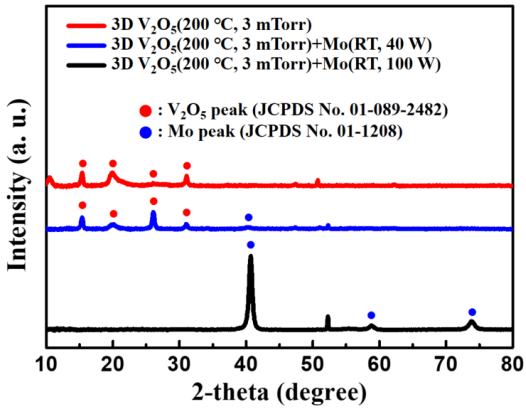

Fig. 4. X-ray Diffraction patterns of 3D V_2O_5 nanostructures and 3D V_2O_5@Mo(40 W, 100 W) nanostructures.

스퍼터링 공정으로 증착된 3D V_2O_5 나노구조물과 3D V_2O_5@Mo(40 W) 나노구조물의 결정성을 확인하기 위해 Raman spectroscopy 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 3D V_2O_5 나노구조물의 분석 결과는 빨간색 실선으로 표시하였고, 3D V_2O_5@Mo(40 W) 나노구조물의 분석 결과는 파란색 실선으로 표시하였다. 두 시료에서 모두 대표적인 V_2O_5의 Raman peak인 파수 147, 199, 286, 303, 404, 484, 702, 996

cm^{-1}에서의 Raman peak이 관찰된 것으로 보아 V_2O_5 결정상이 잘 증착된 것을 알 수 있다[14]. 추가로 순수한 금속에서는 Raman peak을 확인할 수 없는데, 3D V_2O_5@Mo(40 W) 나노구조물의 Raman 분석결과에서 몰리브덴의 Raman peak이 관찰되지 않는 것은 몰리브덴이 순수한 금속 형태로 증착되었기 때문인 것으로 판단된다.

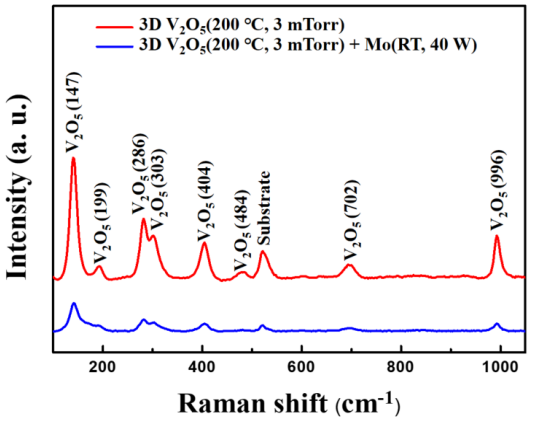

Fig. 5. Raman Spectroscopy analysis results of 3D V_2O_5 nanostructures and 3D V_2O_5@Mo(40 W) nanostructures.

4. 결론

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 공정을 이용하여 3D V_2O_5 나노구조물과 3D V_2O_5@Mo 나노구조물을 증착하였고, 표면 형상과 결정학적 특성 변화를 조사하였다. 연구의 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

첫째, Raman spectroscopy, XRD 분석으로부터, SiO_2/Si 기판의 위에 증착된 3D V_2O_5 나노구조물과 3D V_2O_5@Mo 나노구조물에서 3D V_2O_5 나노구조물은 모두 α-V_2O_5 상을 갖는 것을 확인하였다.

둘째, FE-SEM 분석을 통하여 3D V_2O_5 나노구조물과 3D V_2O_5@Mo 나노구조물 모두 대면적으로 균일하게 증착된 것을 알 수 있다.

셋째, 3D V_2O_5 나노구조물 위에 금속 Mo 박막이 코팅된 시료의 경우, RF power가 40 watt 일 때와 100 watt 일 때의 증착 상태가 다른 것을 확인할 수 있다. 즉 3차원 나노구조물 위에 Mo 박막을 3차원 나노구조물의 형상을 유지한 채 얇게 표면 코팅을 하고자 하는 경우에는 비교적 낮은 RF power인 40 watt가 적합한 것을 알 수 있다.

V_2O_5는 층상구조를 갖고 있으면서 높은 이론적 전기용량을 갖고 있기 때문에 리튬이온배터리의 양극 물질로 주목 받고 있으며, 많은 연구가 진행되고 있는 물질 중 하나이다. 이러한 V_2O_5를 3차원 구조를 갖는 박막 형태로 제작하고, 추가로 V_2O_5의 단점을 보완할 수 있는 금속 Mo 박막을 스퍼터링 공정으로 얇게 코팅한 본 연구의 결과를 리튬이온배터리의 제작에 적용한다면 기존의 V_2O_5 2차원 박막보다 더 우수한 성능을 갖는 리튬이온배터리의 제작이 가능할 것으로 기대된다.

References

[1] Y. Zhao, K. Zheng, X. Sun, "Addressing Interfacial Issues in Liquid-Based and Solid-State Batteries by Atomic and Molecular Layer Deposition", *Joule*, Vol. 2, pp.2583-2604, December, 2018.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.11.012

[2] C. Wang, J. Liang, Y. Zhao, M. Zheng, X. Li, X. Sun., "All-solid-state lithium batteries enabled by sulfide electrolytes: from fundamental research to practical engineering design", *Energy Environ. Sci.*, Vol 14, pp.2577-2619, April, 2021.
DOI: https://doi.org/10.1039/D1EE00551K

[3] Y. Zhang, J. Lai, Y. Gong, Y. Hu, J. Liu, C. Sun, Z. L. Wang, "A Safe High-Performance All-Solid-State Lithium–Vanadium Battery with a Freestanding V_2O_5 Nanowire Composite Paper Cathode", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 8, pp.34309-34316, December, 2016.
DOI: https://doi.org/10.1021/acsami.6b10358

[4] W. Pfleging, "A review of laser electrode processing for development and manufacturing of lithium-ion batteries", *Nanophotonics*, Vol. 7, pp.549-573, December, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0044

[5] Y. Zargouni, S. Deheryan, A. Radisic, K. Alouani, P. M. Vereecken, "Electrolytic Manganese Dioxide Coatings on High Aspect Ratio Micro-Pillar Arrays for 3D Thin Film Lithium Ion Batteries", *Nanomaterials*, Vol. 7, No. 126, May, 2017.
DOI: https://doi.org/10.3390/nano7060126

[6] I. Quinzeni, S. Ferrari, E. Quartarone, P. Mustarelli, "Structural, morphological and electrochemical properties of nanocrystalline V_2O_5 thin films deposited by means of radiofrequency magnetron sputtering", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp.10228-10233, December, 2011.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.08.073

[7] Q. Liu, Z-F. Li, Y. Liu, H. Zhang, Y. Ren, C-J. Sun, W. Lu, Y. Zhou, L. Stanciu, E. A. Stach, J. Xie,

"Graphene-modified nanostructured vanadium pentoxide hybrids with extraordinary electrochemical performance for Li-ion batteries", *Nature Communications*, Vol. 6, No. 6127, January, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms7127

[8] I. Mjejri, M. Gaudon, A. Rougier, "Mo addition for improved electrochromic properties of V_2O_5 thick films", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 198, pp.19-25, August, 2019.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.04.010

[9] Y-S. Kim, H-J. Ahn, H-S. Shim, T-Y. Seong, "Electrochemical and structural properties of MoO_3–V_2O_5 nanocomposite thin film electrodes for lithium rechargeable batteries", *Solid State Ionics*, Vol. 177, pp.1323-1326, June, 2006.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssi.2006.05.031

[10] L-Q. Mai, W. Chen, Q. Xu, J-F. Peng, Q-Y. Zhu, "Mo doped vanadium oxide nanotubes: microstructure and electrochemistry", *Chemical Physics Letters*, Vol. 382, pp.307-312, December, 2003.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cplett.2003.10.067

[11] M-G. Lee, K-C. Kim, "Growth of three-dimensional vanadium oxide nanostructures using the RF magnetron sputtering system", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 23, No. 9, pp.1-7, September, 2022.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.9.1

[12] M. Kaseem, T. Hussain, Z. U. Rehman, M. J. Banisalman, Y. G. Ko, "Advantage of an in-situ reactive incorporation over direct particles incorporation of V_2O_5 for a competitive plasma electrolysis coating", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 399, No. 126200, October, 2020.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126200

[13] J. S. Kang, J. Kim, M. J. Lee, Y. J. Son, D. Y. Chung, S. Park, J. Jeong, J. M. Yoo, H. Shin, H. Choe, H. S. Park, Y-E. Sung, "Electrochemically Synthesized Nanoporous Molybdenum Carbide as a Durable Electrocatalyst for Hydrogen Evolution Reaction", *Advanced Science*, Vol. 5, No. 1700601, December, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1002/advs.201700601

[14] P. Shvets, O. Dikaya, K. Maksimova, A. Goikhman, "A review of Raman spectroscopy of vanadium oxides", *Journal of Raman Spectroscopy*, Vol. 50, pp.1226-1244, May, 2019.
DOI: https://doi.org/10.1002/jrs.5616

이 민 규(Min-Gyu Lee) [준회원]

- 2022년 2월 : 목원대학교 신소재화학공학과 (공학사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 지능정보융합학과 (석사 과정)

〈관심분야〉
에너지 저장소재, 기능성 나노소재

김 기 출(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 교수

〈관심분야〉
에너지 저장 소재, 기능성 나노소재, 나노바이오소재, 가스센서