

RF 마그네트론 스퍼터링 공정제어를 통한 3차원 α -MoO₃ Nanowalls의 성장 기구 연구

김미리¹, 김기출^{1,2*}

¹목원대학교 지능정보융합학과, ²목원대학교 신소재화학공학과

A Study on the Growth Mechanism of Three-Dimensional α -MoO₃ Nanowalls via RF Magnetron Sputtering Process Control

Mee-Ree Kim¹, Ki-Chul Kim^{1,2*}

¹Department of Intelligent Information Convergence, Mokwon University

²Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요약 마이크로 전자장치에 대한 수요가 증가함에 따라 on-chip 공정이 적용된 마이크로 배터리와 고감도 전기 화학 나노센서의 개발이 요구되고 있다. 단위 체적당 표면적 비율이 높은 3차원 나노구조물은 고성능 마이크로 배터리와 우수한 성능을 갖는 화학센서에 적용되어왔다. 본 연구에서는 단위 체적당 표면적 비율이 높은 3D α -MoO₃ nanowalls을 자기조립적 성장 메커니즘이 적용된 RF 마그네트론 스퍼터링 공정으로 제작하였다. 스퍼터링된 나노구조물의 표면형상을 전계방출형 주사전자현미경으로 분석하였고, 결정학적 특성을 Raman 분광학 및 X선 회절법(XRD)으로 분석하였다. 연구결과, 40 W 상온에서 증착된 나노구조물은 layer-by-layer 성장모드에 의한 2D 박막이었다. 반면에 120 W 200 °C에서 스퍼터링된 나노구조물은 3D island 성장모드에 의한 3D nanowalls이었다. Raman 분광학 분석과 XRD 분석 결과, 증착된 2D 박막과 3D nanowalls은 모두 orthorhombic MoO₃(α -MoO₃) 상을 가지고 있었다. 높은 표면적 특성을 갖는 3D α -MoO₃ nanowalls은 고성능 마이크로 배터리 및 화학센서의 제작에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract As the increase of demand for microelectronic devices, development of microbattery and electrochemical nanosensors with high sensitivity is required to fabricate with on-chip process. Three-Dimensional(3D) nanostructures with high specific surface area to volume ratio have been used in advanced microbattery and high performance chemical sensors. In this study, 3D α -MoO₃ nanowalls with high surface area to volume ratio were fabricated using the RF magnetron sputtering process with self-assembled growth mechanism. The morphology of sputtered nanostructures was analyzed by a field emission electron scanning microscope(FE-SEM). The crystallographic property of the sputtered nanostructures was characterized by Raman spectroscopy and X-ray diffraction(XRD). As results, the sputtered nanostructure with 40 W at room temperature exhibits 2D thin film with layer-by-layer growth mode. On the other hand, the sputtered nanostructure with 120 W at 200 °C exhibits 3D nanowalls with 3D island growth mode. According to the analyses of Raman spectroscopy and XRD, the sputtered 2D thin film & 3D nanowalls have an orthorhombic MoO₃(α -MoO₃) phase. The 3D α -MoO₃ nanowalls with high surface area are expected to be applied to fabrication of advanced microbattery and chemical sensors.

Keywords : α -MoO₃, Island Growth Mechanism, Layer-by-Layer Growth, Sputtering, Three-Dimensional Nanostructure

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

email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received October 5, 2021

Revised November 22, 2021

Accepted January 7, 2022

Published January 31, 2022

1. 서론

4차 산업혁명의 시대에는 반도체 공정기술에 기반한 사물 인터넷(IoT: Internet of Things) 장치가 크게 증가할 것으로 예상되고 있다. 특히 MEMS (Microelectromechanical System) 기술로 제작이 가능한 다양한 초소형 센서 및 이식형(implantable) 의료 기기 등이 개발될 것으로 전망된다[1]. 이러한 마이크로 전자장치의 구동을 위해서는 안전하게 장시간 구동이 가능한 초소형 전원(microbattery)이 필요하다[1-3]. 또한 높은 비표면적을 갖고 있어서 고감도 감지가 가능한 나노소재 기반의 다양한 가스 센서가 개발되었다[4,5]. IoT 장치의 microbattery와 고감도 나노센서는 IoT 장치의 구동 회로와 통합되어 제작되는 것이 가장 바람직하며, 반도체 공정 기술을 이용하면, microbattery와 고감도 나노센서를 on-chip 형태로 제작이 가능하다[1-3,5].

전기화학적 반응을 활용하는 다양한 응용(application)에서 높은 비표면적 특성은 장치의 성능을 향상시킬 수 있으므로, 반도체 공정으로 3차원(3D) 나노구조를 구현하는 다양한 연구가 보고되었다[1-3,6]. 하지만 3D 나노구조물을 제작하기 위해서는 포토 리소그라피(photo lithography) 공정을 이용한 패터닝(patterning)과 플라즈마 에칭(plasma etching)과 같은 고가의 장비가 필요하고 복잡한 공정을 수행해야한다[2,6]. 반면에 nano crack[7], tilted growth[8], nanowalls[1,3] 등의 자기 조립적 성장(self-assembled growth) 메커니즘을 적용

하면 3D 나노구조를 복잡한 공정을 적용하지 않고도 비교적 저렴하고 용이하게 구현할 수 있다.

박막의 진공증착 공정에서 2차원 또는 3차원 구조가 형성되는 메커니즘을 Fig. 1에 나타내었다. 박막 성장시 원자들 간의 상호작용에 따라서 3가지 성장모드(growth mode)가 가능하다. 즉 Frank-van der Merwe growth(layer-by-layer growth) mode, Stranski-Krastanov growth(3D island growth on top of predeposited thin-layer) mode, Volmer-Weber growth(3D island growth) mode로 구분되어진다[9]. Fig. 1 (a)는 Frank-van der Merwe 성장모드로서, 금속 원자-금속 원자 간의 상호작용 에너지(ψ_{Me-Me}) 보다 금속 원자-기판 원자 간의 상호작용 에너지(ψ_{Me-S})가 매우 강하고 금속 원자 간의 거리(d_{Me})와 기판 원자 간의 거리(d_S)가 비슷하여 금속 원자-기판 원자의 거리 불일치(Me-S misfit)가 상대적으로 작을 때, 원자가 한층 한층(layer-by-layer) 적층되어 2D 박막(thin film)이 형성된다. Fig. 1 (b)는 Stranski-Krastanov 성장모드로서, 금속 원자-금속 원자 간의 상호작용 에너지보다 금속 원자-기판 원자 간의 상호작용 에너지가 매우 강하지만, 금속 원자 간의 거리와 기판 원자 간의 거리가 같지 않아서 Me-S misfit이 상대적으로 클 때 layer-by-layer growth가 진행되다가 3D island growth가 진행되어 박막 위에 3차원 나노구조물이 성장된다. 마지막으로 Fig. 1 (c)는 Volmer-Weber 성장모드로서, 금속 원자와 기판 원자의 Me-S misfit과 상관없이 금속 원자-금

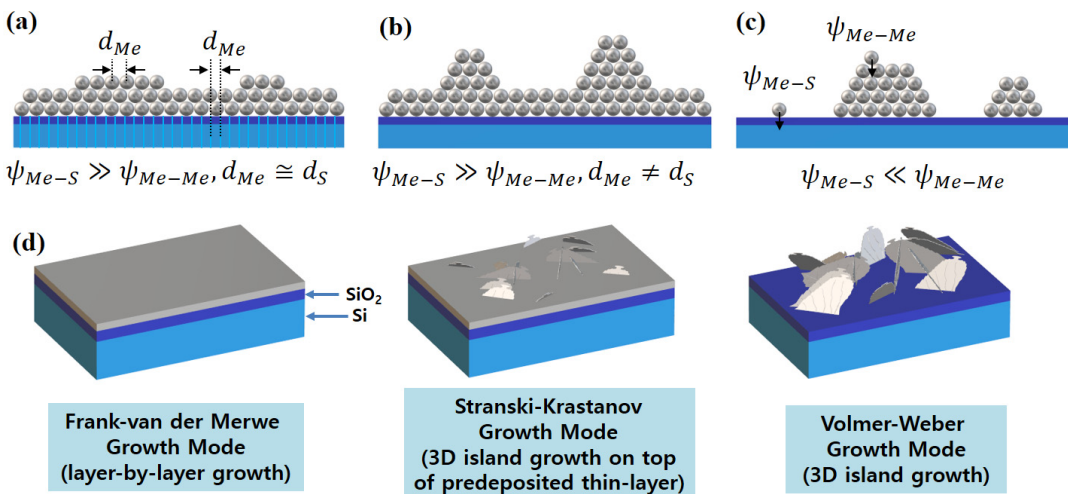


Fig. 1. (a-c) Schematic diagram of different growth modes in metal deposition and (d) illustration of morphology change according to change of ψ_{Me-Me} and d_{Me} [9]

속 원자 간의 상호작용 에너지보다 금속 원자-기판 원자 간의 상호작용 에너지가 매우 약할 때 3D island growth mode로 3D nanowalls이 성장된다. Fig. 1 (d)에는 박막의 진공 증착시 3개의 성장모드를 3차원적 이미지로 나타내었다. 한편 RF 마그네트론 스퍼터링 공정에서는 기판의 온도, 스퍼터링 파워 등을 제어하여 3 가지 성장모드를 구현할 수 있다[1,3].

MoO₃는 n형 반도체 소재로서 가스센서[4], 리튬이온 전지[10], 슈퍼커패시터[11,12] 및 광촉매[13] 등 다양한 응용분야에 활용되고 있다. 특히 열역학적으로 안정한 orthorhombic phase의 α-MoO₃는 층상구조를 가지고 있기 때문에 리튬이온전지의 음극 소재로 적용하면 리튬이온이 쉽게 출입할 수 있고, 이론적 전기용량도 1,117 mAh/g으로 상용 리튬이온전지의 음극소재인 흑연(372 mAh/g)보다 3배정도 크기 때문에 주목을 받고 있다[10]. 하지만 α-MoO₃는 대부분 용액공정인 수열합성법을 이용하여 나노막대(nanorods) 형태로 합성되기 때문에[4,10-13] on-chip 형태로 microbattery를 제작하거나 고감도 나노 센서를 제작할 때 적용하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 반도체 공정을 적용하여 on-chip 형태로 microbattery를 제작하거나 고감도 가스 센서를 제작할 때 적용이 가능한 높은 표면적을 갖는 3D α-MoO₃ nanowalls을 RF 마그네트론 스퍼터링 공정으로 기판 위에 직접 성장시키는 메커니즘에 대하여 연구하였다. 특히 RF 마그네트론 스퍼터링 공정에서 기판의 온도와 스퍼터링 파워가 2D & 3D α-MoO₃ 나노구조물의 형성에 미치는 효과에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

2D 또는 3D α-MoO₃ 나노구조물을 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 Si 웨이퍼 기판(SiO₂(300 nm)/Si) 위에 증착하였다. 1 cm × 1 cm 크기의 Si 웨이퍼 기판을 아세톤, 알콜, 탈이온수(DI water) 속에서 각각 5분씩 초음파 세척하였고, 질소 가스 gun으로 건조시켰다. 세척된 다수의 Si 웨이퍼 기판을 온도가 제어되는 기판 홀더(holder)에 고정시켰다. α-MoO₃ 나노구조물을 증착하기 위해서 직경 3인치 크기의 Mo 타겟(99.95%, Kurt J. Lesker, USA)이 장착된 3-gun RF 마그네트론 스퍼터 시스템을 사용하였고, 스퍼터링 된 Mo 입자와 고순도의 산소(O₂, 99.999%) 가스가 반응하는 reactive sputtering 방법을 사용하였다. 스퍼터링 전의 초기 진

공도는 3×10^{-7} Torr(3.9×10^{-5} Pa) 이하였고, MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 고순도의 산소 가스와 아르곤(Ar, 99.999%) 가스를 각각 10 SCCM(Standard Cubic Centimeter per Minute), 40 SCCM으로 흘려주었다. 이때 Gate Valve를 조절하여 증착시의 압력을 3 mTorr (0.39 Pa)가 되도록 하였다. 타겟과 기판의 거리를 10 cm로 유지하였고, 타겟에 인가하는 RF 파워를 40 W, 80 W, 120 W로 조절하였다. 기판의 온도는 기판 holder 하단에 장착된 히터를 구동하여 상온(27 °C, 이하 RT), 100 °C, 200 °C가 되도록 조절하였고, 스퍼터링될 때의 기판의 온도는 K-type의 열전대(thermocouple)를 이용하여 측정하였다. RF 파워에 따라 증착율이 상이하므로 40 W 조건에서는 4시간 동안 스퍼터링 하였고, 80 W, 120 W 조건에서는 2시간 동안 스퍼터링 하였다.

스퍼터링 공정 후에 기판의 온도가 상온에 도달한 다음에 load-lock 챔버를 통하여 시료를 스퍼터 시스템 밖으로 꺼내어 분석을 실시하였다. Si 웨이퍼 위에 스퍼터링된 산화몰리브덴 나노구조물의 표면형상을 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, JEOL JSM- 6500F)으로 관찰하였고, 시료의 결정학적 특성을 Raman spectroscopy (NOST, FEX)와 X선 회절실험(XRD, Rigaku SmartLab)으로 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

스퍼터링 공정에서 기판의 온도 및 증착 파워에 따른 산화몰리브덴 나노구조물의 표면형상 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 기판의 온도가 상온일 경우, 스퍼터링 파워가 증가할수록 2차원의 박막에서 기판에 수직인 nanowalls과 같은 3D 나노구조물이 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 한편 스퍼터링 파워가 40 W인 경우에는, 기판의 온도가 RT, 100 °C, 200 °C로 증가함에 따라 표면이 매끈한 2D 박막 형태에서 표면에 오돌도돌한 나노구조물이 형성되는 양상으로 변화하였다. 특히 스퍼터링 파워가 120 W인 경우에는 상온에서도 3D nanowalls이 낮은 높이로 형성되었고, 온도가 증가할수록 3D nanowalls의 높이와 밀도가 증가하였다.

스퍼터링 시료의 두께와 단면구조를 분석하기 위하여 cross-sectional FE-SEM 분석을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 2D 박막형상을 갖는 시료부터 3D nanowalls 형상을 갖는 시료의 순서로 배열하였다.

단면 FE-SEM 이미지에서 스퍼터링된 산화몰리브덴 층과 Si 기판의 SiO_2 (300 nm) 층을 구분하기 용이하도록 흰색의 선을 부분적으로 그어서 표시하였다.

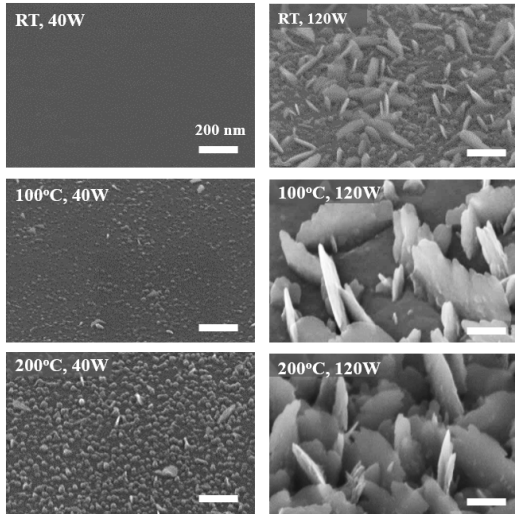


Fig. 2. FE-SEM images(45° tilted view) of α - MoO_3 nanostructures with different deposition temperatures and powers. Magnification of all images is 200,000 times

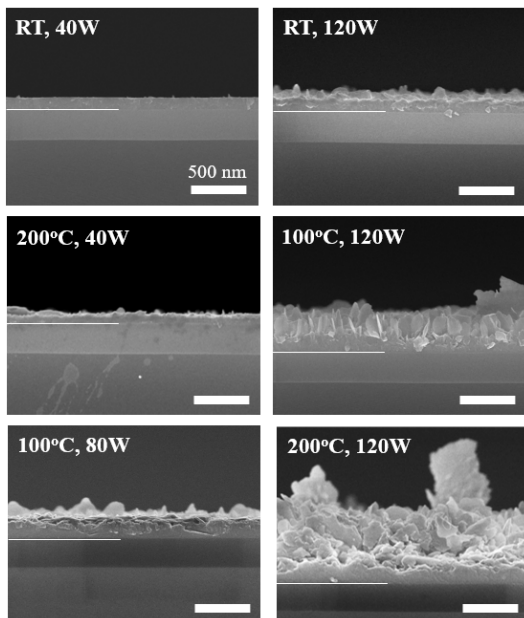


Fig. 3. Cross-sectional FE-SEM images of α - MoO_3 nanostructures with different deposition temperatures and powers. Magnification of all images is 100,000 times

40 W의 스퍼터링 파워로 상온에서 스퍼터링된 시료의 경우, Fig. 2에서 분석된 것처럼 표면에 아무런 구조물이 형성되지 않고 매끈한 2D 박막이 형성되었다. 이것은 명확하게 Fig. 1 (a)에서 설명한 Frank-van der Merwe 성장모드(layer-by-layer growth)로 증착된 것으로 판단된다. 하지만 기판의 온도, 또는 스퍼터링 파워가 증가할수록 2D 박막의 표면에 오돌도돌한 나노구조물이 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 특히 120 W, 상온에서 스퍼터링된 시료의 경우, Fig. 1 (b)에서 설명한 Stranski-Krastanov 성장모드로 성장된 것을 확인할 수 있다. 즉 약 120 nm 두께의 박막이 형성된 다음에 3D nanowalls 형태의 나노구조물이 성장되었다. 한편 120 W, 200 °C의 기판온도에서 스퍼터링된 시료의 경우에는, Fig. 1 (c)에서 설명한 Volmer-Weber 성장모드(3D island growth)로 3D nanowalls이 형성된 것을 확인할 수 있다. nanowalls의 높이는 420 ~ 1200 nm 까지 다양하였다.

FE-SEM 분석결과 스퍼터링 파워가 40 W로 낮고 기판이 상온일 경우에는 기판 원자와 스퍼터링된 원자 간의 상호작용 에너지가 커서 2D 박막이 형성되었다. 하지만 스퍼터링 파워가 증가하거나, 기판의 온도가 증가할수록 기판 원자와 스퍼터링된 원자간의 상호작용 에너지는 감소하고 스퍼터링된 원자간의 상호작용 에너지가 중요해져서 3D nanowalls이 형성되었다.

다양한 기판 온도 및 스퍼터링 파워로 증착된 산화몰리브덴 나노구조물의 결정성을 확인하기 위하여 수행한 Raman 분광법의 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 시료에서 α - MoO_3 상의 Raman shift 피크가 나타났다. 파수 289 cm^{-1} 의 피크는 α - MoO_3 상의 $\text{O}=\text{Mo}=\text{O}$ 결합의 wagging, 파수 340 cm^{-1} 의 피크는 $\text{O}-\text{Mo}-\text{O}$ 결합의 bending, 파수 380 cm^{-1} 의 피크는 $\text{O}-\text{Mo}-\text{O}$ 결합의 scissoring에 의해 나타난다[13]. 또한 파수 666 cm^{-1} 의 피크는 $\text{O}-\text{Mo}-\text{O}$ 결합의 stretching, 파수 819 cm^{-1} 및 994 cm^{-1} 피크는 각각 말단 $\text{Mo}=\text{O}$ 결합의 stretching에 기인한다[13]. 기판의 온도와 스퍼터링 파워가 증가할수록 라만 피크의 강도가 증가하는 경향을 보였다. 특히 기판의 온도보다는 파워에 비례하여 피크의 강도가 증가하였는데, 이것은 라만 산란의 강도가 증착된 소재의 두께에 의존하기 때문이다.

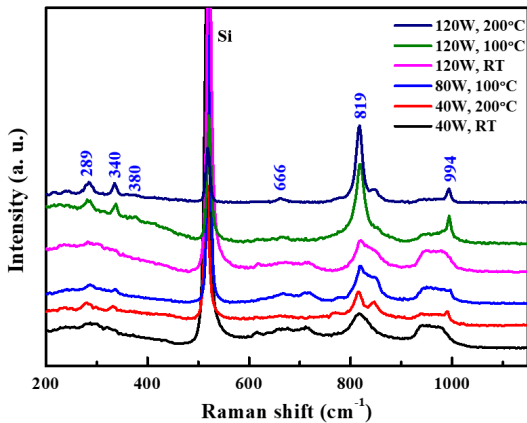


Fig. 4. Raman spectra of α - MoO_3 nanostructures with different deposition temperatures and powers

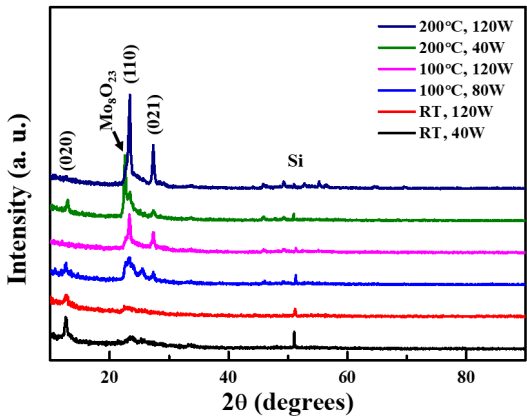


Fig. 5. XRD patterns of α - MoO_3 nanostructures with different deposition temperatures and powers

다양한 조건으로 스퍼터링된 산화몰리브덴 시료의 XRD 분석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 분석결과 α - MoO_3 상 (ICDD, 01-078-4612)의 데이터와 잘 부합하였다 [4,11,13]. 다만 40 W, 200 °C의 조건에서 증착된 시료에서는 22.5°에서 Mo_8O_{23} [3,10] phase의 피크가 상대적으로 크게 관찰되었다. 이 피크는 200 W, 200 °C에서 스퍼터링된 시료를 제외하고는 작지만 모든 시료에서 관찰되었다. Mo_8O_{23} phase는 MoO_3 와 비교하면 산소원자가 1개 부족한 상태이다. 이것은 박막이 성장될 때 Mo 원자가 충분히 산화되지 못하여 나타나는 것으로 판단되며, 피크의 강도는 스퍼터링 파워에 반비례하였다. 120 W, 100 °C & 200 °C에서 증착된 시료의 3D nanowalls은 α - MoO_3 상을 갖고 있었다. XRD 분석에서 피크의 강도를 비교하면 스퍼터링 파워보다는 기판의 온도상승에 더 크게 영향을 받았다. 즉 기판의 온도가 증

가하면 (110)면과 (021)면의 결정성이 증가하였고, 기판의 온도가 낮을수록 (020)면의 피크 강도가 우세하였다. 이것은 (020)면의 피크는 layer-by-layer 성장모드로 성장된 박막에서 기인하고, (110)면과 (021)면의 피크는 3D island growth 모드로 형성된 3D α - MoO_3 nanowalls에서 기인하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 공정에서 기판의 온도와 스퍼터링 파워를 변화시키면서 Si 웨이퍼 기판 위에 성장되는 산화몰리브덴 나노구조물의 성장 메커니즘에 대하여 조사하였고, 연구결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 기판의 온도 및 스퍼터링 파워가 낮을 때(40 W, RT)에는 layer-by-layer 성장모드가 우세하여 표면이 매끄러운 형태의 2D 박막이 성장되었다.

둘째, 기판의 온도와 스퍼터링 파워가 증가할수록 3D island growth 모드가 나타났고, 120 W, 200 °C에서는 island growth 모드에 의한 3D α - MoO_3 nanowalls이 성장되었다.

셋째, 기판의 온도 및 스퍼터링 파워와 관계없이 스퍼터링된 2D & 3D 나노구조물은 모두 α - MoO_3 상이었다.

본 연구에서 제시한 RF 마그네트론 스퍼터링 공정을 제어하여 기판 위에 2D 박막 또는 3D α - MoO_3 nanowalls을 성장시킨 결과는 반도체 공정의 on-chip 공정에 적용할 수 있으며, 특히 3D α - MoO_3 nanowalls은 높은 비표면적을 가지고 있으므로 높은 전기용량이 가능한 리튬이온전지의 음극소재에 활용되거나 고감도 가스센서의 제작에 응용 될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Q. Xia, Q. Zhang, S. Sun, F. Hussain, C. Zhang et al, "Tunnel Intergrowth Li_xMnO_2 Nanosheet Arrays as 3D Cathode for High-Performance All-Solid-State Thin Film Lithium Microbatteries", *Advanced Materials*, Vol. 33, No. 2003524, December 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202003524>
- [2] A. A. Talin, D. Ruzmetov, A. Kolmakov, K. McKelvey, N. Ware et al, "Fabrication, Testing, and Simulation of All-Solid-State Three-Dimensional Li-Ion Batteries", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 8, pp.

- 32385-32391, November 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12244>
- [3] S. Sun, Q. Xia, J. Liu, J. Xu, F. Zan et al, "Self-standing oxygen-deficient α -MoO_{3-x} nanoflake arrays as 3D cathode for advanced all-solid-state thin film lithium batteries", *Journal of Materiomics*, Vol. 5, pp. 229-236, June 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imat.2019.01.001>
- [4] B. G. Rani, S. Saisri, S. Kailasa, M. S. B. Reddy, H. Maseed et al, "Architectural tailoring of orthorhombic MoO₃ nanostructures toward efficient NO₂ gas sensing", *Journal of Materials Science*, Vol. 55, pp. 8109-8122, April 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04601-x>
- [5] S. Yang, C. Jiang, Y-H. Wei, "Gas sensing in 2D materials", *Applied Physics Reviews*, Vol. 4, No. 021304, May 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4983310>
- [6] E. Mills, J. Cannarella, Q. Zhang, S. Bhadra, C. B. Arnold et al, "Silicon nanopillar anodes for lithium-ion batteries using nanoimprint lithography with flexible molds", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 32, No. 6, November 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1116/1.4901878>
- [7] B. Henkel, A. Vahl, O. C. Aktas, T. Strunskus, F. Faupel, "Self-organized nanocrack networks: a pathway to enlarge catalytic surface area in sputtered ceramic thin films, showcased for photocatalytic TiO₂", *Nanotechnology*, Vol. 29, No. 3, December 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa9d35>
- [8] J. Rodríguez, M. Gómez, J. Lu, E. Olsson, C.-G. Granqvist, "Reactively Sputter-Deposited Titanium Oxide Coatings with Parallel Penniform Microstructure", *Advanced Materials*, Vol. 12, pp. 341-343, February 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200003\)12:5<341::AID-ADMA341>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200003)12:5<341::AID-ADMA341>3.0.CO;2-0)
- [9] W. J. Lorenz, G. Staikov, "2D and 3D thin film formation and growth mechanisms in metal electrocrystallization - an atomistic view by in situ STM", *Surface Science*, Vol. 335, pp. 32-43, July 1995.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(95\)00576-5](https://doi.org/10.1016/0039-6028(95)00576-5)
- [10] Z. Xu, Y. Zhao, J. He, T. Wang, J. Yang et al, "MoO₃/Carbon Dots Composites for Li-Ion Battery Anodes", *Chemistry of NanoMaterials*, Vol. 5, No. 7, pp. 921-925, April 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1002/cnma.201900140>
- [11] N. G. Prakash, M. Dhananjaya, A. L. Narayana, D. PMD Shaik, P. Rosaiah et al, "High Performance One Dimensional α -MoO₃ Nanorods for Supercapacitor Applications", *Ceramics International*, Vol. 44, No. 8, pp. 9967-9975, June 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.032>
- [12] N. Maheswari, G. Muralidharan, "Controlled synthesis of nanostructured molybdenum oxide electrodes for high performance supercapacitor devices", *Applied Surface Science*, Vol. 416, pp. 461-469, September 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.094>
- [13] X. Guan, Y. Ren, S. Chen, J. Yan, G. Wang et al, "Charge separation and strong adsorption-enhanced MoO₃ visible light photocatalytic performance", *Chemical routes to materials*, Vol. 55, pp. 5808-5822, February 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04418-8>

김 미 리(Mee-Ree Kim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 목원대학교 신소재 화학공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 충남대학교 신소재 공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 지능정보융합학과 (박사 과정)

〈관심분야〉

에너지관련 소재, 기능성 소재, 그래핀, 가스센서

김 기 출(Ki-Chul Kim)

[중신회원]



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

〈관심분야〉

에너지 저장소재, 가스센서, 에너지 하베스팅 소재