

RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용한 3차원 바나듐 옥사이드 나노구조물의 성장

이민규, 김기출*
목원대학교 지능정보융합학과

Growth of Three-Dimensional Vanadium Oxide Nanostructures using the RF Magnetron Sputtering System

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

요약 바나듐 옥사이드는 저렴한 가격과 높은 이론적 전기용량 및 독특한 특성으로 인하여 고성능 리튬이온전지의 양극소재, 고감도 가스센서 감지물질 및 68 °C에서 가역적인 금속-절연체 상전이 특성을 갖는 써모크로믹 소재로서 스마트 윈도우 물질로 많은 주목을 받아왔다. 나노구조의 물질은 높은 유효표면적을 갖기 때문에 고성능 리튬이온전지 및 고감도 가스센서에 적용되어왔다. 본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 공정에서 산소가스 분압에 따른 오산화 바나듐 나노구조물의 표면형상 변화를 조사하였다. 바나듐 옥사이드 나노구조물은 200 °C에서 1시간 동안 200 watt로 다양한 산소가스 분압하에서 Si 기판($\text{Si}/\text{SiO}_2(300 \text{ nm})$) 위에 증착되었다. 바나듐 옥사이드 나노구조물의 표면형상을 전계방출형 주사전자현미경으로 분석하였고, 결정학적 특성을 X선 회절법(XRD) 및 Raman 분광학으로 분석하였다. 연구결과, 증착된 모든 바나듐 옥사이드 나노구조물은 $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$ 상을 가지고 있었다. 또한 산소가스 분압이 감소할수록 수직으로 정렬된 나노구조물의 밀도는 증가하였다. 높은 표면적 특성을 갖는 3D $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$ 나노구조물은 고성능 리튬이온전지 및 가스센서 제작에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Vanadium oxides have received much attention as advanced cathode materials for lithium-ion batteries (LIBs), highly sensitive gas-sensing materials, and thermochromic materials for smart windows with a reversible metal-insulator phase transition at 68°C. This is due to their low price, high theoretical capacity, and noble properties. Nanostructured materials have been applied to advanced LIBs and highly sensitive gas sensors due to their large effective surface area. In this study, the morphology change of vanadium pentoxide nanostructures was investigated according to the partial pressure of oxygen gas in an RF magnetron sputtering process. Vanadium oxide nanostructures were sputtered on Si substrate($\text{Si}/\text{SiO}_2(300 \text{ nm})$) at 200°C for 1 hour at 200 watt, under various partial pressures of oxygen gas. The surface morphology of vanadium oxide nanostructures was analyzed by a field emission scanning electron microscope(FE-SEM). The crystallographic properties of the vanadium oxide nanostructures were characterized by X-ray diffraction(XRD) and Raman spectroscopy. The sputtered vanadium oxide nanostructures exhibit $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$ phase for all sputtering conditions. As the partial pressure of oxygen gas decreased, the density of vertically aligned nanostructures was increased. The 3D $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$ nanostructures with high surface area are expected to be applied to the fabrication of advanced LIBs and gas sensors.

Keywords : Vanadium Oxide, RF Magnetron Sputtering, Effect of Oxygen Gas, Growth Mode, 3D Nanostructure

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

email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received July 8, 2022

Accepted September 2, 2022

Revised August 9, 2022

Published September 30, 2022

1. 서론

스마트폰이 생활필수품처럼 사람들의 일상에서 활용됨에 따라 무선 이어폰, 스마트 워치 등 모바일 디바이스의 사용이 증가하고 있다. 또한, 다양한 전자기기는 점점 소형화 되어가고 있으며, 소형화된 전자기기에서는 크기가 작고, 높은 전기용량으로 오랜 시간동안 전원공급이 가능하며, 충전시간이 짧고, 모양에 구애받지 않아서 다양한 디자인의 구현이 가능한 초소형 배터리(micro battery)에 대한 수요가 증가하고 있다. 현재 모바일 전자기기의 전원으로 적용되고 있는 리튬이온전지(Lithium-ion Batteries, 이후 LIBs)는 다른 이차전지보다 전기용량이 크기 때문에 노트북 및 스마트폰의 전원으로 적용되고 있다. 하지만 액체 전해질을 사용하기 때문에 LIBs의 모양에 구애를 크게 받으며, 과충전, 충격 등으로 화재의 가능성이 있기 때문에 전기용량, 사이클 수명, 안전성 측면에서 초소형 배터리의 요구사항을 충족하기에는 아직 부족하다. 상용 LIBs의 음극 물질로 사용되고 있는 흑연(graphite)은 372 mAh/g의 이론적 전기용량과 비슷한 실제 전기용량을 갖지만, 양극 물질로 사용되고 있는 리튬 코발트 산화물(LiCoO₂)은 274 mAh/g의 이론적 전기용량의 절반인 약 140 mAh/g의 실제 전기용량을 갖는다[1]. 배터리의 용량과 전압은 일반적으로 LIBs에 적용되는 양극 물질에 따라 달라지기 때문에 높은 전기용량과 높은 구동 전압이 가능한 양극 소재를 찾는 것은 여전히 숙제로 남아있다[2]. 박막형 전고체 배터리는 고체 전해질을 사용하기 때문에 안전하며, 양극 물질/고체 전해질/음극 물질을 반도체 공정으로 적층하기 때문에 크기가 작고, 모양이나 크기에 구애를 받지 않는 장점이 있어 초소형 배터리에 적합하다. 하지만 많은 연구에도 불구하고, 높은 구동전압과 높은 전기용량, 우수한 사이클 수명특성 등이 가능한 초소형 배터리는 아직 상용화되어 있지 않은 실정이다.

LIBs의 양극소재인 리튬 코발트 산화물(LiCoO₂)은 4.3 V[3], 리튬 망간 산화물(LiMn₂O₄)은 4.3 V[4], 리튬 인산철(LiFePO₄)은 3.4 V[5]의 구동 전압을 갖고 있으며 비교적 우수한 사이클 수명으로 인하여 LIBs의 양극 물질로서 광범위하게 적용되어 왔다. 그러나 이들은 400~800 °C 정도로 높은 증착 온도를 요구하는 문제점이 있다[2,6]. 하지만 바나듐 산화물(vanadium oxide)은 스퍼터링(sputtering)과 같은 진공 시스템에 의해 300 °C 정도의 비교적 낮은 온도에서 증착이 가능하다는 장점이 있다. 바나듐 산화물은 VO, VO₂, V₂O₃, V₂O₅,

V₆O₁₃... 등 매우 다양한 산화 상태로 존재하는데, 그 중에서 오산화 바나듐(vanadium pentoxide, 이하 V₂O₅)이 가장 안정적인 바나듐 산화물이다[7]. 오산화 바나듐(V₂O₅)은 무독성이며 자연에 풍부하여 가격이 저렴하고, 층상 구조를 이루고 있어 단위 셀(unit cell)당 최대 3개의 리튬 이온의 삽입 및 추출이 가능하다는 장점이 있다[6,8]. 또한 리튬 코발트 산화물(LiCoO₂)의 이론적 전기용량은 274 mAh/g, 리튬 인산철(LiFePO₄)의 이론적 전기용량은 170 mAh/g으로 작지만 오산화 바나듐(V₂O₅)의 이론적 전기용량은 약 440 mAh/g으로 높은 이론적 전기용량을 갖는 양극 물질이다[9,10].

오산화 바나듐(V₂O₅) 박막을 증착하는 방법으로는 이온 빔 증착법(ion beam deposition)[11], 펄스 레이저 증착법(pulsed laser deposition)[12], 스퍼터링법(sputtering)[13], 열 증착법(thermal evaporation)[14], 스프레이 열분해법(spray pyrolysis)[15], 졸-겔법(sol-gel)[16], 화학 기상 증착법(CVD, Chemical Vapor Deposition)[17]과 같은 다양한 방법들이 있다. 이 중에서 스퍼터링법은 박막의 두께 균일성과 균질성 및 재현성이 우수하고, 공정변수 조절에 따른 막질 제어가 용이하다는 장점이 있다[13].

스퍼터링법을 이용하여 박막을 증착하는 경우에는 원자들 간의 상호작용 에너지에 따라 3가지 성장모드로 박막이 성장한다. 『기판 입자-증착 입자』의 상호작용 에너지보다 『증착 입자-증착 입자』의 상호작용 에너지가 더 강한 경우에는 Fig. 1의 (a)와 같이 성장하는 Volmer-Weber 성장모드(3D island growth)로 성장하고, 『증착 입자-증착 입자』의 상호작용 에너지보다 『기판 입자-증착 입자』의 상호작용 에너지가 더 강한 경우에는 Fig. 1의 (b)와 같이 성장하는 Frank-van der Merwe 성장모드(layer-by-layer growth)로 성장한다. 박막 형성 초기에는 Frank-van der Merwe 성장을 일으켜 먼저 박막 층이 형성되고, 그 위에 Volmer-Weber 모드로 성장하여 island로 성장하는 경우에는 Fig. 1의 (c)와 같이 Stranski-Krastanov 성장모드(3D island growth on top of layer-by-layer grown thin-layer)로 성장한다[18,19].

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 SiO₂/Si 기판 위에 각각 다른 산소 가스 분압으로 바나듐 산화물 박막을 증착하여 산소 가스 분압에 따른 바나듐 산화물 나노구조물의 표면형상 변화를 조사하였다.

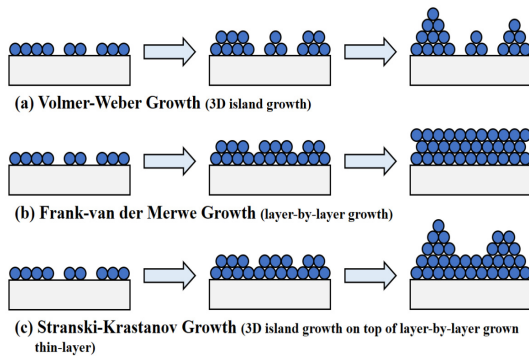


Fig. 1. Schematic representation of thin film growth modes[18,19]

2. 실험방법

바나듐 옥사이드 나노구조물은 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템에서 바나듐 타겟 (Kurt J. Lesker, 순도 99.96%, 지름 50 mm)을 이용하여 증착하였다. 실리콘 기판($\text{SiO}_2(300 \text{ nm})/\text{Si}(100)$)을 아세톤, 에탄올, 탈이온수(deionized water) 속에서 각각 5분씩 초음파 세척한 뒤, 질소 가스 gun으로 건조시켜 사용하였다. 초기 진공도는 터보 분자 펌프(turbo molecular pump)를 이용하여 5.0×10^{-7} Torr 이하로 유지하였고, 초기 진공도가 5.0×10^{-7} Torr 이하로 도달한 뒤 히터를 구동하여 기판 온도를 200°C 로 유지해주었다. 기판 온도가 200°C 에 도달하면 질량 유량 제어기(MFC: Mass Flow Controller)를 이용해 고순도 아르곤 가스(Ar, 99.999%)와 고순도 산소 가스(O_2 , 99.999%)를 흘려주었다. 이때, 산소 가스 분압을 20.0 Vol%, 5.0 Vol%, 3.0 Vol%로 각각 다르게 흘려주었다. 공정 압력은 게이트 밸브(gate valve)를 조절하여 3 mTorr로 유지하였고, 바나듐 타겟(vanadium target)과 기판과의 거리는 100 mm, RF 파워는 200 Watt로 고정하였다. 20분간 예비 스퍼터링(pre-sputtering)을 실시하여 바나듐 타겟의 표면 오염물을 제거하였다. 예비 스퍼터링 이후 각각 1 시간동안 증착하였다. 증착이 끝난 후, 히터의 구동을 멈추고 기판의 온도가 상온에 도달한 뒤에 시료를 chamber 밖으로 꺼냈다.

서로 다른 산소 가스 분압으로 증착된 바나듐 옥사이드 나노구조물의 표면 형상과 단면 구조를 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM: Field Emission Scanning Electron Microscope, 이하 FE-SEM)으로 관찰하였고,

결정학적 특성은 Raman spectroscopy와 X선 회절실험(XRD: X-Ray Diffraction, 이하 XRD)으로 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

스퍼터링 공정에서 각각 다른 산소 가스 분압에서 Si 기판 위에 스퍼터링 된 바나듐 옥사이드 나노구조물의 표면 형상을 FE-SEM으로 관찰하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2 (a-c)를 비교해보면 산소 가스 분압에 따라 바나듐 옥사이드 박막에서의 나노구조물이 성장되는 양상이 다른 것을 확인할 수 있다. 산소 가스 분압이 20.0 Vol%, 5.0 Vol%, 3.0 Vol%로 감소할수록 Si 기판 표면에 성장되는 바나듐 옥사이드 나노구조물의 밀도가 증가하고, 나노구조물의 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 2의 (d-f)를 비교해보면 이러한 나노구조물의 성장이 Si 기판의 일부분에 국한되어 나타나는 것이 아니고, 기판 전체에 대면적으로 나타나는 현상이라는 것을 확인할 수 있다.

박막을 증착하는 경우에는 원자들 간의 상호작용 에너지에 따라 Volmer-Weber 성장모드(3D island growth), Frank-van der Merwe 성장모드(layer-by-layer growth), Stranski-Krastanov 성장모드(3D island growth on top of layer-by-layer grown thin-layer)로 박막이 기판 위에 증착된다. 각각 다른 산소 가스 분압에서 스퍼터링 된 바나듐 옥사이드 나노구조물의 단면 구조와 박막의 두께를 분석하기 위해 Cross-sectional FE-SEM 분석을 하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (a-c)를 비교해보면 증착된 바나듐 옥사이드 나노구조물의 성장모드를 확인할 수 있다. 모든 박막은 layer-by-layer grown thin-layer 위에 3D island growth하는 Stranski-Krastanov 성장모드로 성장한 것으로 확인되었다. 하지만 layer-by-layer grown thin-layer의 두께에는 차이가 있었다. 산소 가스 분압이 20.0 Vol%인 경우에는 약 25.5 nm, 5.0 Vol%인 경우에는 약 45.3 nm, 3.0 Vol%인 경우에는 약 47.0 nm로 산소 가스의 분압이 낮을수록 더 두꺼운 layer-by-layer grown thin-layer가 형성되었고, 그 위에 성장한 3D island 바나듐 옥사이드 나노구조물도 더 조밀하며, 크기도 더 높고 크게 성장되었다.

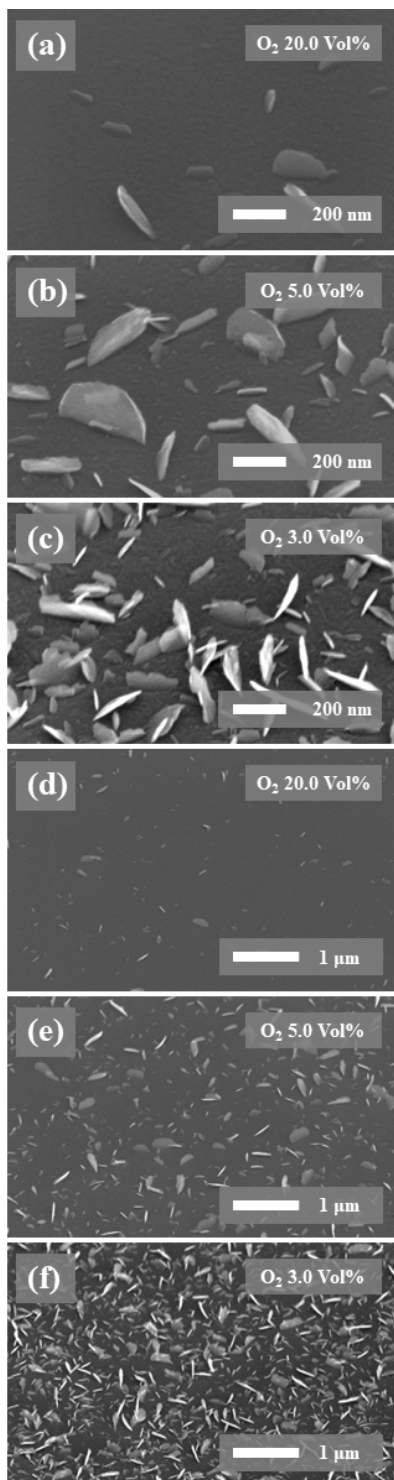


Fig. 2. FE-SEM images(45° tilted view) of vanadium oxide nanostructures with different partial pressure of oxygen gas. (a-c) 200k times, (d-f) 50k times

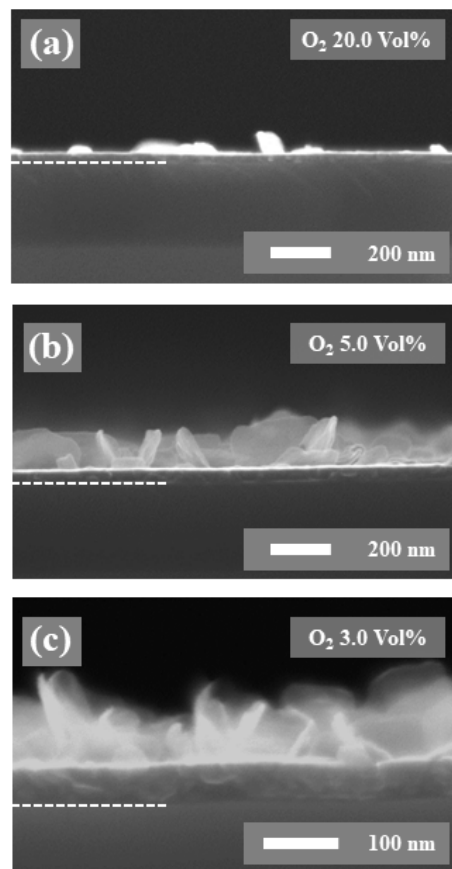


Fig. 3. Cross-sectional FE-SEM images of sputtered vanadium oxide nanostructures with different partial pressure of O_2 gas. White dashed line is a boundary between substrate(SiO_2/Si) & sputtered vanadium oxide nanostructures. (a, b) 200k times, (c) 500k times

바나듐 옥사이드는 매우 다양한 상(phase)으로 존재하는데 V_2O_5 또한 α - V_2O_5 , β - V_2O_5 , δ - V_2O_5 , γ' - V_2O_5 , ζ' - V_2O_5 , ϵ' - V_2O_5 를 포함하여 최소 6개의 동질상이 존재한다[20]. 그 중에서 가장 일반적인 V_2O_5 는 orthorhombic 구조를 갖는 α - V_2O_5 이다. 각각 다른 산소 가스 분압에서 스퍼터링 된 바나듐 옥사이드 나노구조물의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 Raman Spectroscopy와 XRD 분석을 실시하였고, 그 결과를 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에 나타난 Raman Spectroscopy 분석 결과를 검토해 보면 산소 가스 분압이 20.0 Vol%, 5.0 Vol%, 3.0 Vol%인 모든 박막에서 α - V_2O_5 의 상에서 나타나는 Raman peaks인 파수 104, 147, 199, 286, 303, 404, 484, 702, 996 cm^{-1} 의 피크가 일치하는 것을 볼 수 있다[20]. 스퍼터링

공정변수인 산소 가스 분압이 변함에도 불구하고 Raman 분석에서 파수의 peak 강도가 크게 변하지 않은 것은 Raman 분석은 skin depth가 낮아 시료의 표면 상태를 분석하기 때문이며, 산소 가스의 분압이 다른 상태에서 증착된 박막 모두 V_2O_5 결정상을 갖는 것으로 분석되었다.

보다 더 자세한 결정학적 특성을 분석하기 위하여 XRD 분석을 실시하였고, 결과를 Fig. 5에 나타내었다. XRD 분석 결과를 ICDD Card No. 01-089-2482(α - V_2O_5)와 비교한 결과 Si 기판 위에 증착된 모든 바나듐 옥사이드 나노구조물의 결정구조와 결정상은 orthorhombic 구조의 α - V_2O_5 결정상이었다.

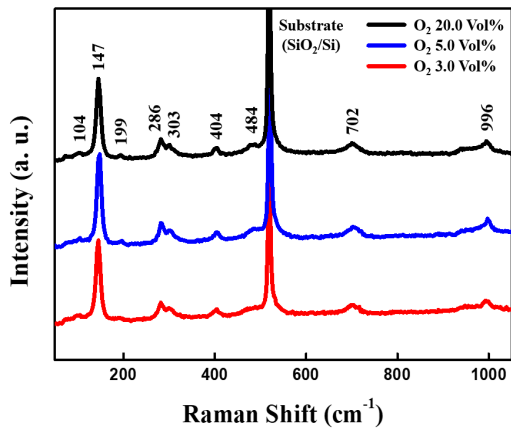


Fig. 4. Raman spectra of sputtered vanadium oxide nanostructures with different partial pressure of O_2 gas

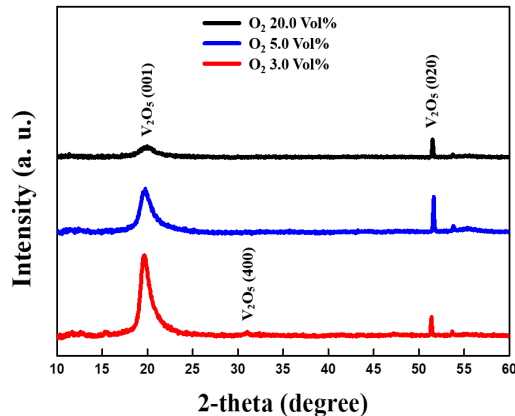


Fig. 5. XRD patterns of sputtered vanadium oxide nanostructures with different partial pressure of O_2 gas

산소 가스 분압이 20.0 Vol%, 5.0 Vol%, 3.0 Vol%로 감소함에 따라 (001) 면의 peak 강도가 증가하였고, (020) 면의 peak 강도는 크게 변하지 않았다. 이것은 (020) 면의 peak는 layer-by-layer 성장모드로 성장된 박막에서 기인하고, (001)면의 peak는 3D island growth 모드로 형성된 3D 나노구조물에서 기인하기 때문이다.

박막 성장에 대하여 일반적으로 받아들여지고 있는 이론은 원자 또는 분자가 기판 위에서 핵형성(nucleation)과 성장과정(diffusion on grain boundaries)을 거쳐 박막을 형성한다는 것이다. 또한 TLK (Terrace-Ledge-Kink) 모델에서는 원자 또는 분자가 기판 표면에 흡착된 후 표면 에너지를 낮추기 위해 terrace에서 ledge, kink로 이동하면서 박막 또는 나노구조물로 성장한다고 설명한다[21]. abnormal growth 모델에서는 박막의 두께가 2~6 nm로 매우 얇을 때에는 핵형성 후 균일하게 grain growth(diffusion on grain boundaries)가 일어나는 normal grain growth mechanism이 주로 나타나지만, 박막의 두께가 6 nm 이상으로 보다 두꺼워지면 abnormal grain growth mechanism(surface diffusion)도 동시에 나타나며 normal grain과 abnormal grain의 표면 에너지 차이에 의해서 선호하는 방향으로 빠른 grain growth가 일어난다고 설명한다[22]. 박막의 성장에 대하여 다양한 성장 메커니즘으로 설명하지만, 스퍼터링과 진공증착(E-beam evaporation 또는 thermal evaporation) 또는 화학 기상 증착(CVD) 공정으로 기판 위에 물질을 증착할 때, 결국에는 기판의 온도와 증착되는 물질의 과포화도에 따라서 비정질(amorphous), 다결정(polycrystals), dendrites, platelets, epitaxial growth 등 다양한 형태로 증착된다[23].

본 연구에서 수행한 바나듐 옥사이드 스퍼터링 실험에서는 Fig. 1에서 설명한 3가지 성장모드 중에서 layer-by-layer grown thin layer 위에 3D island growth하는 Stranski-Krastanov 성장모드로 성장되었다. 하지만 보다 높은 유효표면적의 나노구조물을 형성시키기 위해서는 기판 위에 3D 나노구조물이 직접 성장되는 Volmer-Weber 성장모드로 나노구조물이 성장되는 것이 바람직하며, 향후 추가적인 연구를 통하여 기판 위에 3D 나노구조물이 직접 성장되는 공정조건을 탐색할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 $\text{SiO}_2(300 \text{ nm})/\text{Si}$ 기판 위에 산소 가스 분압을 달리하면서 바나듐 옥사이드 나노구조물을 성장시켰고, 산소 가스 분압에 따른 바나듐 옥사이드 나노구조물의 표면 형상과 결정학적 특성을 FE-SEM, Raman Spectroscopy, XRD로 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, $\text{SiO}_2(300 \text{ nm})/\text{Si}$ 기판 위에 성장된 바나듐 옥사이드 나노구조물은 모든 조건에서 $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$ 상을 갖는 것을 확인하였다.

둘째, 산소 가스 분압이 20.0 Vol%, 5.0 Vol%, 3.0 Vol%로 감소함에 따라 성장되는 V_2O_5 나노구조물의 밀도가 증가하고, 나노구조물의 크기도 증가하는 것을 확인하였다.

셋째, 산소 가스 분압이 3.0 Vol%일 때, (001) 결정면 방향으로 나노구조물의 성장이 우세하였고, 높은 비표면적을 갖는 3D V_2O_5 나노구조물이 성장하는 것을 확인하였다.

RF 마그네트론 스퍼터링 시스템에서 산소 가스 분압 3.0 Vol%의 조건으로 성장된 바나듐 옥사이드 나노구조물은 3D 형태의 나노구조물로서 높은 표면적을 갖고 있기 때문에 높은 전기용량의 리튬이온 배터리의 양극 물질, 또는 고감도의 가스센서 감지물질로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] E. Brown, J. Acharya, G. P. Pandey, J. Wu, J. Li, "Highly Stable Three Lithium Insertion in Thin V_2O_5 Shells on Vertically Aligned Carbon Nanofiber Arrays for Ultrahigh-Capacity Lithium Ion Battery Cathodes", *Adv. Mater. Interfaces*, Vol.3, #1600824, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.201600824>
- [2] C. Navone, R. Baddour-Hadjean, J. P. Pereira-Ramos, R. Salot, "High-Performance Oriented V_2O_5 Thin Films Prepared by DC Sputtering for Rechargeable Lithium Microbatteries", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.152, No.9, pp.1790-1796, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1990160>
- [3] H. K. Park, "The Research and Development Trend of Cathode Materials in Lithium Ion Battery", *Journal of the Korean Electrochemical Society*, Vol.11, No.3 pp.197-210, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.5229/JKES.2008.11.3.197>
- [4] D. Tang, L. Ben, Y. Sun, B. Chen, Z. Yang, L. Gu, X. Huang, "Electrochemical behavior and surface structural change of LiMn_2O_4 charged to 5.1 V", *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 2, No. 35, pp. 14519-14527, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1039/C4TA02109F>
- [5] H. Zheng, L. Chai, X. Song, V. Battaglia, "Electrochemical cycling behavior of LiFePO_4 cathode charged with different upper voltage limits", *Electrochimica Acta*, Vol.62, pp.256-262, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.12.019>
- [6] C. Navone, S. Tintignac, J. P. Pereira-Ramos, R. Baddour-Hadjean, R. Salot, "Electrochemical behaviour of sputtered c- V_2O_5 and LiCoO_2 thin films for solid state lithium microbatteries", *Solid State Ionics*, Vol.192, pp.343-346, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.04.023>
- [7] M. Kang, J. Jung, S. Y. Lee, J. W. Ryu, S. W. Kim, "Conductivity, carrier density, mobility, Seebeck coefficient, and power factor in V_2O_5 ", *Thermochimica Acta*, Vol.576, pp.71-74, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.11.026>
- [8] I. Quinzeni, S. Ferrari, E. Quartarone, P. Mustarelli, "Structural, morphological and electrochemical properties of nanocrystalline V_2O_5 thin films deposited by means of radio frequency magnetron sputtering", *Journal of Power Sources*, Vol.196, pp.10228-10233, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.08.073>
- [9] S. Petnikota, R. Chua, Y. Zhou, E. Edison, M. Srinivasan, "Amorphous Vanadium Oxide Thin Films as Stable Performing Cathodes of Lithium and Sodium-Ion Batteries", *Nanoscale Research Letters*, Vol.13, #363, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2766-0>
- [10] Q. Liu, Z. F. Li, Y. Liu, H. Zhang, Y. Ren et al, "Graphene-modified nanostructured vanadium pentoxide hybrids with extraordinary electrochemical performance for Li-ion batteries", *Nature Communications*, Vol.6, #6127, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms7127>
- [11] T. Gallasch, T. Stockhoff, D. Baither, G. Schmitz, "Ion beam sputter deposition of V_2O_5 thin films", *Journal of Power Sources*, Vol.196, pp.428-435, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.06.099>
- [12] R. T. Rajendra kumar, B. Karunakaran, D. Mangalaraj, Sa. K. Narayandass, P. Manoravi et al, "Properties of pulsed laser deposited vanadium oxide thin film thermistor" *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.6, pp.375-377, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2003.08.023>
- [13] C. Navone, R. Baddour-Hadjean, J. P. Pereira-Ramos, R. Salot, "Sputtered Crystalline V_2O_5 Thin Films for All-Solid-State Lithium Microbatteries", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.156, pp.763-767, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3170922>

- [14] R. T. Rajendra Kumar, B. Karunakaran, V. Senthil Kumar, Y. L. Jeyachandran, D. Mangalaraj et al, "Structural properties of V_2O_5 thin films prepared by vacuum evaporation", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.6, pp.543-546, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2003.08.017>
- [15] M. Abbasi, S. M. Rozati, R. Irani, S. Beke, "Synthesis and gas sensing behavior of nanostructured V_2O_5 thin films prepared by spray pyrolysis", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.29, pp.132-138, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.01.008>
- [16] D. Vasanth Raj, N. Ponpandian, D. Mangalaraj, C. Viswanathan, "Effect of annealing and electrochemical properties of sol-gel dip coated nanocrystalline V_2O_5 thin films", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.16, pp.256-262, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2012.11.001>
- [17] H. Groult, K. Le Van, A. Mantoux, L. Perrigaud, P. Doppelt, "Study of the Li^+ insertion into V_2O_5 films deposited by CVD onto various substrates", *Journal of Power Sources*, Vol.174, pp.312-320, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.045>
- [18] M. R. Kim, K. C. Kim, "A Study on the Growth Mechanism of Three-Dimensional α - MoO_3 Nanowalls via RF Magnetron Sputtering Process Control", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.1, pp.92-97, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.1.92>
- [19] 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, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(95\)00576-5](https://doi.org/10.1016/0039-6028(95)00576-5)
- [20] 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, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/jrs.5616>
- [21] K. Aldushin, G. Jordan, W. W. Schmahl, "Kinematics of apophyllite leaching - A terrace-ledge-kink process within phyllosilicate interlayers", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 297, pp.161-168, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.08.042>
- [22] F. Ruffino, M. G. Grimaldi, C. Bongiorno, F. Giannazzo, F. Roccaforte, V. Raineri, C. Spinella, "Normal and abnormal grain growth in nanostructured gold film", *Journal of Applied Physics*, Vol. 105, #054311, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3093681>
- [23] J. I. Choi, "The study of structure-property-process in Alumina Coating of Steel by Chemical Vapour Deposition Process", *Journal of the Metal Finishing Society of Korea*, Vol. 22, No. 3, pp.135-144, 1989.

이 민 규(Min-Gyu Lee)

[준회원]



- 2022년 2월 : 목원대학교 신소재 화학공학과 (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 : 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 교수

〈관심분야〉

에너지 저장소재, 기능성 나노소재, 나노바이오소재, 가스센서