

RF 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 리튬 이온 이차전지 양극용 바나듐 옥사이드 박막에 관한 연구

장기준, 김기출*
목원대학교 신소재화학공학과

A Study on the Vanadium Oxide Thin Films as Cathode for Lithium Ion Battery Deposited by RF Magnetron Sputtering

Ki-June Jang, Ki-Chul Kim*
Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요약 이산화바나듐은 잘 알려진 금속-절연체 상전이 물질이며, 바나듐 레독스 흐름 전지는 대규모 에너지 저장장치로 활용하기 위해서 많은 연구가 이루어져왔다. 본 연구에서는 바나듐 옥사이드 (VO_x) 박막을 리튬이온 이차전지의 양극으로 적용하는 연구를 수행하였다. 이를 위해서 VO_x 박막을 실리콘 웨이퍼 위에 열산화공정으로 300 nm 두께의 SiO_2 층이 형성된 Si 기판 및 쿼츠 기판 위에 RF 마그네트론 스퍼터 시스템으로 60분 동안 500 °C에서 다른 RF 파워로 증착하였다. 증착된 VO_x 박막의 표면형상을 전계방출 주사전자현미경으로 조사하였고, 결정학적 특성을 Raman 분광학으로 분석하였다. 투과율 및 흡수율과 같은 광학적 특성은 자외선-가시광선 분광계로 조사하였다. Cu Foil 위에 증착된 VO_x 박막을 리튬이온전지의 양극물질로 적용하여 CR2032 코인셀을 제작하였고, 전기화학적 특성을 조사하였다. 그 결과 증착된 VO_x 박막은 RF 파워가 증가할수록 낱알 크기가 증가하였고, RF 파워 200 W 이상에서 증착된 박막은 VO_2 상을 나타내었다. 증착된 VO_x 박막의 투과율은 결정상에 따라 다른 값을 나타내었다. VO_x 박막의 이차전지 특성은 높은 표면적을 가질수록, 결정상이 혼재될수록 높은 충방전 특성을 나타내었다.

Abstract Vanadium dioxide is a well-known metal-insulator phase transition material. Lots of researches of vanadium redox flow batteries have been researched as large scale energy storage system. In this study, vanadium oxide(VO_x) thin films were applied to cathode for lithium ion battery. The VO_x thin films were deposited on Si substrate(SiO_2 layer of 300 nm thickness was formed on Si wafer via thermal oxidation process), quartz substrate by RF magnetron sputter system for 60 minutes at 500 °C with different RF powers. The surface morphology of as-deposited VO_x thin films was characterized by field-emission scanning electron microscopy. The crystallographic property was confirmed by Raman spectroscopy. The optical properties were characterized by UV-visible spectrophotometer. The coin cell lithium-ion battery of CR2032 was fabricated with cathode material of VO_x thin films on Cu foil. Electrochemical property of the coin cell was investigated by electrochemical analyzer. As the results, as increased of RF power, grain size of as-deposited VO_x thin films was increased. As-deposited thin films exhibit VO_2 phase with RF power of 200 W above. The transmittance of as-deposited VO_x films exhibits different values for different crystalline phase. The cyclic performance of VO_x films exhibits higher values for large surface area and mixed crystalline phase.

Keywords : Cathode Material, Lithium Ion Battery, RF Magnetron Sputtering, Thin Films, Vanadium Dioxide

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1H1A2039732). This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea Government(Ministry of Science and ICT) (No. 2019R1H1A2039732).

*Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon Univ.)

Tel: +82-42-829-7489 email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received February 12, 2019

Revised March 6, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

1. 서론

최근에 미세먼지 및 지구온실가스 배출문제는 환경, 건강, 지구온난화와 관련하여 사회적으로 많은 관심을 받고 있으며, 미세먼지와 유해가스를 배출하지 않고 전기에너지를 생산할 수 있는 에너지원을 개발하기 위하여 세계적으로 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 전기에너지는 현대인의 삶에서 매우 중요하며, 현재 국내 전력생산의 대부분을 화석연료와 원자력 발전이 담당하고 있다. 화석연료를 이용한 발전에서는 미세먼지 및 지구온실가스와 각종 유해가스를 배출하는 문제점이 있다. 또한 원자력발전도 사고발생시 방사능 누출의 위험을 안고 있기 때문에, 화력발전과 원자력 발전을 대체할 수 있는 녹색에너지원의 개발은 인류가 해결해야 할 중요한 문제이다. 대표적 녹색에너지인 풍력발전과 태양광발전은 현재보다 에너지 효율을 높이는 문제 외에도, 바람이 불지 않거나 밤에도 전력을 안정적으로 공급할 수 있는 대규모 에너지저장장치(Energy Storage System, 이하 ESS)가 구비되어야 한다[1].

ESS 기술은 저장방법에 따라 물리적 저장, 화학적 저장, 전자기적 저장, 열적 저장으로 분류할 수 있으며, 현재에는 화학적 저장인 리튬이온전지(Li-Ion Battery, 이하 LIB)가 일반적으로 활용되고 있다[1]. 하지만 리튬은 매장량에 한계가 있고, 안정성이 떨어지는 문제점이 있어서 LIB보다 저가이면서 안정적인 ESS 기술개발이 시대적으로 요구되고 있으며, LIB를 대체할 수 있는 차세대 이차전지로서 슈퍼커패시터(Super-Capacitor), 나트륨황((NaS) 전지, 바나듐 레독스 흐름전지(Vanadium Redox Flow Battery), 리튬이온전지 등이 활발하게 연구되고 있다 [2-5].

이산화바나듐(Vanadium Dioxide, 이하 VO₂)은 대표적인 상전이(Phase Transition) 물질로서 68 °C 이하에서는 전기적으로 부도체처럼 저항이 매우 크고, 광학적으로 투명한 특성을 갖는 Monoclinic 구조를 갖지만 68 °C 이상에서는 Tetragonal(또는 Rutile) 구조로 상전이 되어 전기적으로 도체처럼 저항이 작고, 광학적으로 불투명해지는 특성을 가지고 있다. 이러한 금속-부도체 상전이(Metal-Insulator Transition, 이하 MIT) 특성을 이용하여 초고속 광소자[6], 가스센서[7], 응력센서(Strain Sensor)[8], 이차전지[2,9,10] 등에 응용되고 있다.

MIT와 관련된 초창기 연구에서는 VO₂ 박막을 증착하기 위하여 펄스 레이저 증착법(Pulsed Laser Deposition)[11], RF 마그네트론 스퍼터링법(Radio

Frequency Magnetron Sputtering)[12] 등이 주로 사용되었다. 하지만 화학기상증착법(Cheical Vapor Deposition, 이하 CVD)을 이용한 단결정 VO₂ 나노와이어의 합성과 MIT 특성에 대한 연구가 보고된 이후 [13], CVD를 이용하여 VO₂ 나노와이어의 지름을 조절하여 상전이 온도를 상온부근으로 내리는 연구[14] 및 분자선역피택시법(Molecular Beam Epitaxy, MBE)으로 VO₂ 초박막을 성장하여 MIT 특성을 규명[15]하는 등 과학적인 현상규명에 대한 연구가 대부분이었고, 응용연구는 상대적으로 많지 않았다.

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링법으로 Si 기판 및 퀴츠(Quartz) 웨이퍼 위에 바나듐 옥사이드(VO_x) 박막을 증착하여 기본적인 물성을 분석하였고, Cu Foil 위에 VO₂ 박막을 증착한 후 코인셀(Coin Cell) 형태의 LIB를 제작하여 전기화학적 특성을 조사하였다.

2. 실험방법

바나듐 옥사이드(VO_x) 박막은 다음과 같은 과정으로 RF 마그네트론 스퍼터로 증착되었다. 바나듐 옥사이드 박막의 물성분석을 위하여 1 cm × 1 cm 크기의 Si 기판과 퀴츠 기판을 아세톤, 알콜, 탈이온수 속에서 각각 5 분씩 초음파 세척하였고, 고순도 질소 가스 Gun으로 건조시켰다. 세척된 다수의 기판을 기판 홀더(Holder)에 고정시켰다. 일부 기판은 증착율을 측정하기 위해서 단차를 형성시켰다. 바나듐 옥사이드 박막은 터보 분자펌프(Turbo-Molecular Pump)가 장착된 3-Gun RF 마그네트론 스퍼터 시스템을 이용하여 증착되었다. 초기 진공도는 5.0 × 10⁻⁷ Torr 이하였으며, 기판 히터를 구동하여 기판의 온도를 500 °C로 유지시킨 다음, 질량 유량 제어기(Mass Flow Controller, MFC)를 이용하여 고순도 아르곤(Ar, 99.999%) 가스와 산소(O₂, 99.999%) 가스를 50 sccm (Standard Cubic Centimeters per Minute, 이하 sccm)으로 흘려주었다. 증착된 박막이 VO₂ 상을 갖도록 하기 위해서 선행연구를 참고하여 Ar 48.65 sccm, O₂ 1.35 sccm으로 조절하였고, 게이트 밸브(Gate Valve)를 조절하여 스퍼터링의 공정압력을 3.0 mTorr가 되도록 하였다. 이후 20분간의 예비스퍼터링(Pre-Sputtering)을 통하여 바나듐 타겟(Vanadium Target)의 표면 오염물을 제거하였다. 실험에 사용된 바나듐 타겟은 순도 99.96%, 지름 50 mm(태원과학(주))이었다. RF 파워(Power)를 조절하여 100 watt, 200

watt, 300 watt로 각각의 시료를 60분간 증착하였다. 증착이 끝난 후 기판 히터의 구동을 멈추고 아르곤 가스와 산소 가스의 공급도 중단한 상태에서 게이트 밸브를 최대한으로 열어 최저 진공도를 유지한 상태에서 기판의 온도가 상온에 도달한 다음, 시료를 꺼냈다.

증착된 VO_x 박막의 두께는 단차가 형성된 각각의 Si 기판 시료에 대하여 원자힘현미경(Atomic Force Microscopy, 이하 AFM)으로 분석하였다. AFM 분석은 비접촉식 모드(Non-Contact Mode)로 측정하였다 (Park System, XE-100). 스퍼터링 파워에 따른 VO_x 박막의 표면형상은 전계방출 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscopy, 이하 FE-SEM, FEI, Sirion)으로 조사하였고, 결정학적 특성은 Raman 분광학(Raman Spectroscopy, NOST, FEX)으로 평가하였다. VO_x 박막의 광학적 특성은 쿼츠 웨이퍼 위에 증착된 각각의 시료에 대하여 자외선-가시광선 분광계(UV-visible Spectrophotometer, Scinco, Mega-800)로 분석하였다.

VO_x 박막의 리튬이온 이차전지의 양극특성을 평가하기 위하여 CR2032 형태의 코인셀을 제작하였다. 코인셀 제작을 위해서 위에서 설명한 공정조건으로 VO_x 박막을 Si 기판과 같은 세척공정을 거친 Cu Foil(Alfa Aesar, 99.8%, #13382) 위에 RF 마그네트론 스퍼터로 증착하였다. 코인셀은 고순도 아르곤 가스가 채워진 글러브 박스(Glove Box) 안에서 제작되었다. 코인셀의 양극(Cathode Electrode)은 Cu Foil 위에 증착된 VO_x 박막을 사용하였고, 음극(Anode Electrode)은 Li Foil(Alfa Aesar, 99.9% metal basis)을 사용하였다. 분리막은 미세기공 폴리에틸렌(Microporous Polyethylene, Celgard 2400)을 사용하였고, 전해액은 이차전지 전해액 품질의 1.0 M $LiPF_6$ (Lithium Hexafluorophosphate, Sigma Aldrich) 용액을 사용하였다.

RF 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 VO_x 박막을 리튬이온 이차전지의 양극으로 적용하여 제작된 CR2032 코인셀의 전기화학적 특성을 평가하기 위하여 코인셀을 상온으로 일정하게 온도가 유지되는 전기로의 내부에 위치시킨 다음, 전기화학 분석기(Electrochemical Analyzer, Wonatech, WBCS3000)로 전기화학적 특성을 분석하였다.

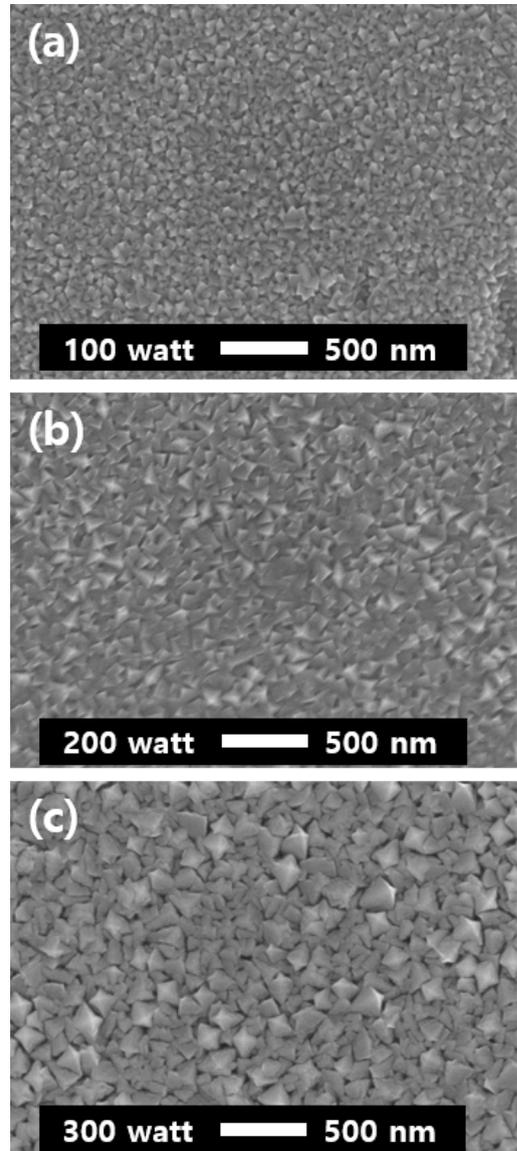


Fig. 1. FE-SEM images of as-deposited VO_x thin films on SiO_2 (300 nm)/Si substrates with RF power (a) 100 watt, (b) 200 watt (c) 300 watt deposited at 500 °C substrate temperature.

3. 실험결과 및 고찰

RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 증착 파워를 달리 하여 성막 된 VO_x 박막의 표면형상을 FE-SEM으로 분석하였고, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. RF 파워가 증가할수록 Si 기판에 입사되는 에너지가 크기 때문에 증착된

VO_x 박막의 표면 거칠기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. VO_x 박막이 성장되는 기판의 온도가 500 °C로 유지되었기 때문에 스퍼터 된 바나듐 분자들이 고상화되기 전에 VO₂ 상으로 결정화되기에 적절한 에너지가 공급되었다고 판단된다. 특히 RF 파워가 증가할수록 스퍼터 된 바나듐 분자들이 갖는 에너지가 증가하고, 결정 낱알 (Crystalline Grain)의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

RF 마그네트론 스퍼터로 증착된 바나듐 옥사이드 박막의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 Raman 분석을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. RF 파워가 100 watt인 Fig. 2(a)의 경우, VO₂ 상과 V₆O₁₃ 상이 혼

재된 형태로 분석되었다. 하지만 RF 파워가 200 watt 및 300 watt인 Fig. 2 (b), (c)의 경우에는 오직 VO₂ 상만 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 1의 FE-SEM 분석결과에서도 확인할 수 있는 것처럼, 스퍼터 된 바나듐 분자들이 갖는 에너지에 따라서 바나듐 옥사이드 박막의 결정성이 좌우되는 것을 알 수 있다. 특히 스퍼터로 증착된 박막의 경우, 기판의 온도, 공정 분위기에서의 산소 가스의 부분압력, RF 파워 등이 바나듐 옥사이드 박막의 결정성을 좌우한다고 알려져 있다[12,13].

쿼츠 기판 위에 RF 파워를 달리하여 증착된 VO_x 박막의 광학적 특성을 자외선-가시광선 분광계로 분석하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. AFM 분석으로 분석된 VO_x 박막의 두께는 RF 파워 100 watt에서 두께 641 nm, RF파워 200 watt에서 두께 634 nm, RF파워 300 watt에서 두께 868 nm로 분석되었다. 따라서 RF 파워 100 watt와 200 watt에서 증착된 바나듐 옥사이드 박막의 두께는 거의 비슷하다고 간주할 수 있으나, 광학적 투과율은 RF 파워 200 watt 및 300 watt로 증착된 박막이 같은 결과를 나타내었다. 이것은 박막의 두께는 바

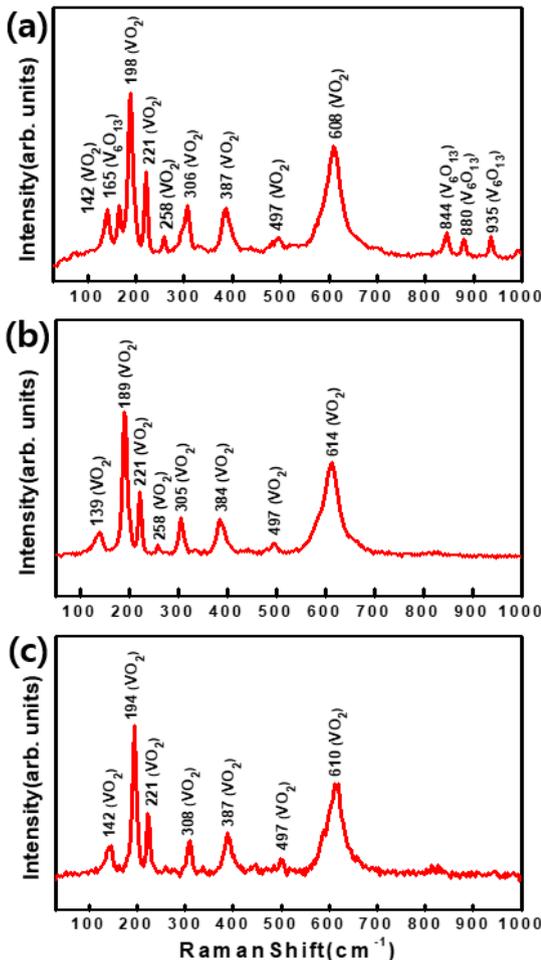


Fig. 2. Raman spectra of as-deposited VO_x thin films on SiO₂(300 nm)/Si substrates with RF power (a) 100 watt, (b) 200 watt (c) 300 watt deposited at 500 °C substrate temperature.

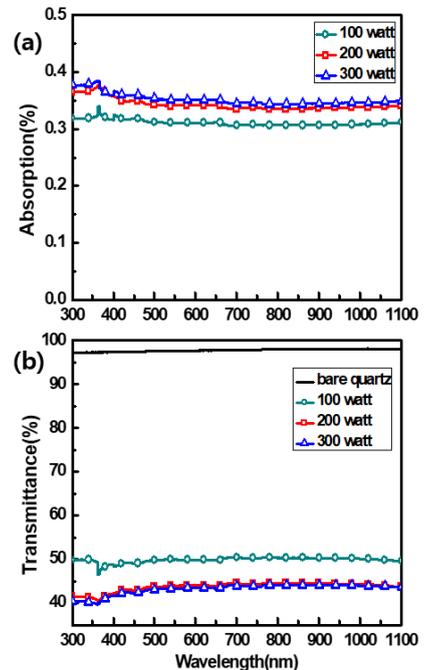


Fig. 3. Optical (a) absorption and (b) transmittance of as-deposited VO_x thin films on quartz substrates for different RF power of 100 watt, 200 watt, and 300 watt, respectively.

나뭇 옥사이드 박막의 투과율에 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있게 해준다. RF 파워 300 watt에서 증착된 바나뭇 옥사이드 박막보다 200 nm 이상 얇은 RF 파워 200 watt에서 증착된 바나뭇 옥사이드 박막의 투과율과 흡수율이 RF 파워 300 watt에서 증착된 박막과 동일한 수준으로 분석되었다. 따라서 바나뭇 옥사이드 박막의 광학적 특성은 박막의 두께보다는 박막이 갖는 결정상과 관계한다는 것을 확인할 수 있다. RF 파워 100 watt에서 증착된 바나뭇 옥사이드 박막은 VO₂ 상과 V₆O₁₃ 상이 혼재된 형태인 것을 Raman 분석으로부터 확인하였고, 이러한 결정상의 차이가 광학적 투과율 및 흡수율에도 영향을 미치는 것을 확인하였다[11,12].

RF 마그네트론 스퍼터의 RF 파워를 달리하여 Cu Foil 위에 증착된 바나뭇 옥사이드 박막을 리튬이온 이차전지의 양극으로 적용하여 제작된 CR2032 코인셀의 충전, 방전 사이클 특성을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 전기화학 분석기에 적용된 인가전압은 1.5 V ~ 3.5 V 이었고, 스캔 비율(Scan Rate)은 0.1 mV/sec이었으며, 100 mA/g의 일정 전류모드(Constant Current Mode)로 측정하였다. 측정된 전기용량값은 기대하였던 것보다 매우 작게 측정이 되었다. 이것은 수열합성법으로 합성된 VO₂ 나노시트를 나트륨이온전지(Sodium-Ion Battery)의 양극으로 적용시켰을 때 얻은 전기용량 (100 mAh/g)과 비교해도 상당히 작은 값이며[9], 펄스 레이저 증착법으로 스테인레스 스틸(Stainless Steel) 기판 위에 증착된 비정질 바나뭇 옥사이드(Amorphous Vanadium Oxide) 박막을 나트륨이온전지의 양극으로 적용시켰을 때 얻은 전기용량 110 mAh/g보다도 작은 값이다[4]. 본 연구에서 제작된 리튬이온전지는 양극물질을 Cu Foil 위

에 증착하였고, 위에서 비교한 선행연구 결과는 리튬이온 이차전지보다 전기용량 특성이 우수하여 차세대 이차전지로 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있는 나트륨이온 전지의 양극으로 적용된 결과이기 때문에 직접적인 비교에는 한계가 있으나, 본 연구에서 제작된 VO_x 박막 기반의 LIB 코인셀의 전기용량 특성은 향후 추가연구를 통하여 향상시킬 필요성이 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링으로 RF 파워를 달리하여 증착된 바나뭇 옥사이드 박막의 물리적 특성을 분석하였고, 바나뭇 옥사이드 박막을 리튬이온전지의 양극으로 적용하여 코인셀을 제작하여 전기화학 특성을 조사하였으며, 연구결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, RF 파워가 증가할수록 바나뭇 옥사이드 박막의 날알크기가 증가하였고, RF 파워 200 watt 이상에서는 VO₂ 단일상을 갖고 있었다.

둘째, 바나뭇 옥사이드 박막의 광학적 특성은 박막 두께와는 무관하고 결정학적 상에 영향 받았다.

셋째, RF 마그네트론 스퍼터로 증착된 바나뭇 옥사이드 박막을 리튬이온전지의 양극으로 적용하여 코인셀을 제작하고, 전기화학적 특성을 분석한 결과 박막의 표면적이 클수록, 박막의 결정상이 VO₂ 단일상이 아닌, 복합상을 가질 때 전기용량 특성이 큰 것으로 분석되었다.

이상에서 검토한 것과 같이 바나뭇 옥사이드 박막을 리튬이온전지의 양극으로 적용하여 특성을 분석한 결과, 전기용량을 향상시키기 위하여 Cu Foil 대신 Ni Foil 또는 Stainless Steel 위에 VO_x 박막을 증착하거나, VO_x 박막의 두께를 일정하게 유지한 후 VO_x 박막의 표면형을 제어하거나 또는 표면형을 일정하게 유지하고 박막의 두께를 제어하는 등의 추가적인 연구를 통하여 VO_x 박막의 리튬이온 이차전지 양극소재로의 적용 가능성을 검토할 예정이다.

References

- [1] A. Habib, C. Sou, "Analytical review on the trends and present situation of large-scale sustainable energy storage technology", *European Journal of Sustainable Development Research*, Vol. 8, Issue 3, No. 31, July, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20897/ejosdr/86200>
- [2] K. Chayambuka, G. Mulder, D. L. Danilov, P. H. L.

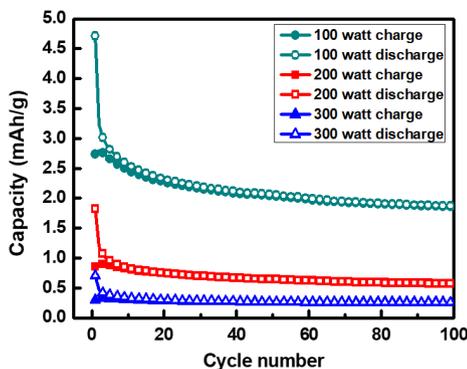


Fig. 4. Cyclic performance of VO_x thin films for different RF power of 100 watt, 200 watt, and 300 watt, respectively.

- Notten, "Sodium-ion battery materials and electrochemical properties reviewed", *Advanced Energy Materials*, Vol. 8, No. 1800079, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201800079>
- [3] D. Su, D. Zhou, C. Wang, G. Wang, "Toward high performance lithium-sulfur batteries based on Li₂S cathodes and beyond: status, challenges, and perspectives", *Advanced Functional Materials*, Vol. 28, No. 1800154, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201800154>
- [4] 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, No. 363, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2766-0>
- [5] W. Yang, W. Yang, L. Kong, A. Song, X. Qin, G. Shao, "Phosphorus-doped 3D hierarchical porous carbon for high-performance supercapacitors: A balanced strategy for pore structure and chemical composition", *Carbon*, Vol. 127, pp. 557-567, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.11.050>
- [6] B. T. O'Callahan, A. C. Jones, J-H. Park, D. H. Cobden, J. M. Atkin, M. B. Raschke, "Inhomogeneity of the ultrafast insulator-to-metal transition dynamics of VO₂", *Nature Communications*, Vol. 6, No. 6849, April, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7849>
- [7] E. Strelcov, Y. Lilach, A. Kolmakov, "Gas sensor based on metal-insulator transition in VO₂ nanowire thermistor", *Nano Letters*, Vol. 9, No. 6, pp. 2322-2326, May, 2009.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/nl900676n>
- [8] B. Hu, Y. Ding, W. Chen, D. Kulkarni, Y. Shen, V. V. Tsukruk, Z. L. Wang, "External-strain induced insulating phase transition in VO₂ nanobeam and its application as flexible strain sensor", *Advanced Materials*, Vol. 22, pp. 5134-5139, 2010.
DOI: <http://doi.org/10.1002/adma.201002868>
- [9] W. Wang, B. Jiang, L. Hu, Z. Lin, J. Hou, S. Jiao, "Single crystalline VO₂ nanosheets: A cathode materials for sodium-ion batteries with high rate cycling performance", *Journal of Power Sources*, Vol. 250, pp. 181-187, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.11.016>
- [10] C. Pei, F. Xiong, J. Sheng, Y. Yin, S. Tan, D. Wang, C. Han, Q. An, L. Mai, "VO₂ nanoflakes as the cathode material of hybrid magnesium-lithium-ion batteries with high energy density", *ACS Applied Materials and Interfaces*, Vol. 9, pp. 17060-17066, 2017.
DOI: <http://doi.org/10.1021/acsami.7b02480>
- [11] G. I. Perrov, V. V. Yakovlev, "Raman microscopy analysis of phase transformation mechanisms in vanadium dioxide", *Applied Physics Letters*, Vol. 81, No. 6, pp. 1023-1025, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1496506>
- [12] C. Zhang, Q. Yang, C. Koughia, F. Ye, M. Sanayei, S-J. Wen, S. Kasap, "Characterization of vanadium oxide thin films with different stoichiometry using Raman spectroscopy", *Thin Solid Films*, Vol. 620, pp. 64-69, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2016.07.082>
- [13] B. S. Guiton, Q. Gu, A. L. Prieto, M. S. Gudiksen, H. Park, "Single-crystalline vanadium dioxide nanowires with rectangular cross sections", *Journal of American Chemistry Society*, Vol. 127, pp. 498-499, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ja045976g>
- [14] L. Hongwei, L. Junpeng, Z. Minrui, T. S. Hai, S. C. Haur, Z. Xinhai, K. Lin, "Size effects on metal-insulator phase transition in individual vanadium dioxide nanowires", *Optics Express*, Vol. 22, No. 25, pp. 30748-30755, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.22.030748>
- [15] N. F. Quackenbush, J. W. Tashman, J. A. Mundy, S. Sallis, H. Paik, R. Misra, J. A. Moyer, J-H. Guo, D. A. Fischer, J. C. Woicik, D. A. Muller, D. G. Schlom, L. F. J. Piper, "Nature of the metal insulator transition in ultrathin epitaxial vanadium dioxide", *Nano Letters*, Vol. 13, pp. 4857-4861, 2013.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/nl402716d>

장 기 준(Ki-June Jang)

[준(학생)회원]



- 2015년 3월 : 목원대학교 신소재 화학공학과 입학
- 2019년 2월 : 목원대학교 신소재 화학공학과 (공학사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : ROTC 복무 중

<관심분야>

에너지 저장소재, 그래핀, 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 신소재화학공학과 교수

<관심분야>

에너지 저장소재, 가스센서, 에너지 하베스팅 소재