

스퍼터링 공정을 이용한 고성능 전고체 전지의 제작

이민규, 김기철*

목원대학교 대학원 지능정보융합학과

*e-mail: kckim30@mokwon.ac.kr

Fabrication of Advanced All-Solid-State Batteries Using the Sputtering Process

¹Department of Intelligent Information Convergence, Graduate School of Mokwon University

요 약

가연성 유기용매인 액체 전해질을 사용하는 리튬이온전지의 안전성 문제로 인해 안전한 전지의 개발이 요구되고 있다. 차세대 전지로서 많은 연구가 진행되고 있는 전고체 전지는 리튬이온전지와 달리 고체 상태의 전해질을 사용하여 화재 및 폭발 등의 안전성 문제를 해결할 수 있는 전지 중 하나이다. 본 연구에서는 스퍼터링 공정을 이용하여 고성능의 전고체 전지 제작을 위한 연구를 진행하였다. 박막형 전고체 전지는 2차원 V_2O_5 박막과 자기조립적 나노구조를 갖는 3차원 V_2O_5 전극을 이용하여 제작하였다. 제작한 2차원 V_2O_5 박막과 3차원 V_2O_5 나노구조물의 표면 형상은 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM)으로 관찰하였고, 이들의 결정학적 특성은 Raman Spectroscopy로 평가하였다.

1. 서론

최근 전기자동차 시장이 확대됨에 따라 전원으로 사용되고 있는 리튬이온전지(lithium ion battery)의 용량 및 수명 특성과 같은 전지의 성능 개선 및 생산 단가 절감을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1]. 그러나 리튬이온전지는 양극재(cathode material)와 음극재(anode material) 사이에 가연성의 유기용매인 액체 전해질(electrolyte)을 사용하기 때문에, 열폭주 등으로 인한 화재 및 폭발의 위험성이 있다. 따라서 보다 안전한 전지의 개발이 요구되고 있다[2-4]. 차세대 전지 중 하나인 전고체 전지(all-solid-state battery)는 가연성 유기용매인 액체전해질과 분리막(separator) 대신 황화물계, 산화물계 또는 고분자계의 고체 전해질을 사용하는 전지를 말한다. 고체 상태의 전해질을 사용하는 전고체 전지는 물리적 접촉을 차단하여 화재나 폭발의 위험을 감소시켜 안전성을 향상시키고, 공정을 단순화시킬 수 있고, 높은 에너지 밀도를 가질 수 있는 차세대 전지이다. 전고체 전지의 제작은 [그림 1]과 같이 음극재/전해질/양극재를 적층하여 제작하며, 전고체 전지의 구조를 2차원 박막 형태의 구조가 아닌 3차원 구조물이 있는 형태로 제작하는 경우, 유효표면적을

증가시켜 출력 밀도(power density)와 에너지 밀도(energy density)를 증가시킬 수 있다[4].

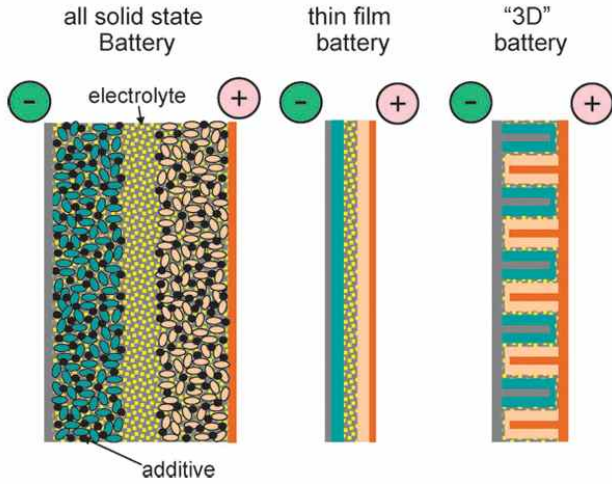
본 연구에서는 스퍼터링 공정을 이용한 선행 연구 결과인 2차원 V_2O_5 박막과 3차원 V_2O_5 나노구조물을 활용하고, 뛰어난 계면특성을 갖는 고체 전해질인 LiPON을 사용하여 2차원 박막과 3차원 구조를 갖는 전고체 전지를 제작하였다[5].

2. 실험방법

모든 증착 공정은 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하였다. V_2O_5 증착에는 V 타겟(vanadium, 지름 2인치, 순도 99.96 %, Kurt J. Lesker)을 이용하였고, 고체 전해질인 LiPON은 Li_3PO_4 타겟(lithium phosphate, 지름 3인치, 순도 99.95 %, Kurt J. Lesker)을 이용하였다. SiO_2/Si 기판을 아세톤, 에탄올, 탈이온수에서 초음파 세척한 뒤, 질소 가스 gun으로 건조하였다. 초기 진공도는 터보 분자 펌프(turbo molecular pump)를 이용하여 5.0×10^{-7} Torr 이하를 유지하였고, 고순도 아르곤 가스(Ar, 순도 99.999%)와 고순도 산소 가스(O_2 , 순도 99.999%), 고순도 질소 가스(N_2 , 순도 99.999%)는 질량 유량 제어기(mass flow controller)를 이용하여 조절하였다.

RF 마그네트론 스퍼터링 공정을 이용하여 증착한 2차원 V_2O_5

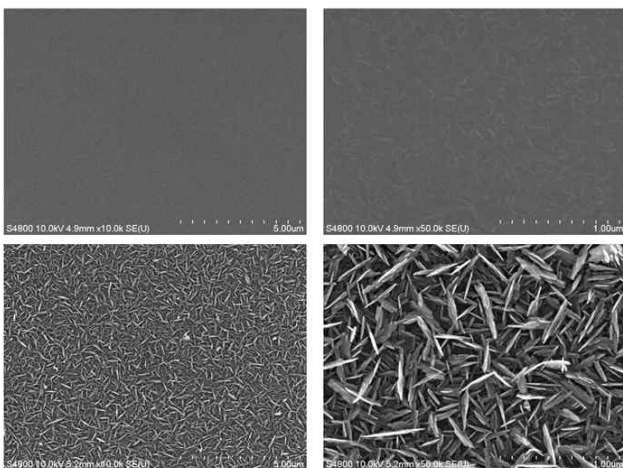
박막 및 3차원 V_2O_5 나노구조물의 표면 형상은 전계방출형 주사 전자현미경(field emission scanning microscope, FE-SEM)을 통해 관찰하였고, Raman spectroscopy 분석을 통해 결정학적 특성을 확인하였다.



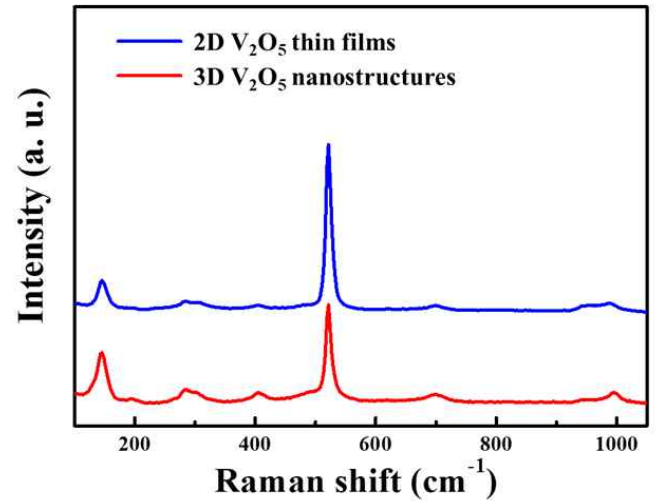
[그림 1] 진공 공정을 통해 제작하는 전고체 전지의 모식도[4]

3. 실험결과 및 고찰

스퍼터링 공정을 통해 증착한 2차원 박막 및 3차원 나노구조물의 표면 형상을 [그림 2]에 나타내었다. [그림 2]의 위에 나타난 FE-SEM 이미지를 통해 기판의 매끈한 표면을 따라 Frank-van der Merwe 성장모드로 2차원 V_2O_5 박막이 균일하게 증착된 것을 확인하였다. 또한 [그림 2]의 아래에 나타난 FE-SEM 이미지를 통해 매끈한 표면의 기판 위에 Stranski-Krastanov 성장모드로 3차원 V_2O_5 나노구조물이 촘촘하고 균일하게 증착된 것을 확인하였고, 2차원 박막에 비해 3차원 나노구조물의 구조가 높은 비표면적을 갖는 것을 확인하였다.



[그림 2] 2차원 V_2O_5 박막(상단)과 3차원 V_2O_5 나노구조물(하단)의 FE-SEM 이미지



[그림 3] 2차원 V_2O_5 박막(파란색)과 3차원 V_2O_5 나노구조물(빨간색)의 Raman 분석 결과

2차원 박막 및 3차원 나노구조물의 결정상을 확인하기 위한 Raman 분석 결과를 [그림 3]에 나타내었다. Raman 분석 결과, 2차원 박막과 3차원 나노구조물 모두 파수 147, 199, 286, 303, 404, 702, 996 cm^{-1} 에서 모두 V_2O_5 결정상의 Raman peak가 관찰되었다[6].

4. 결론

본 연구에서는 차세대 전지인 전고체 전지의 고성능화를 위한 연구를 진행하였다. 높은 유효 표면적을 갖는 형태의 3차원 구조의 전고체 전지를 제작하고자 전극으로 사용할 3차원 V_2O_5 나노구조물을 대면적으로 균일하게 증착하였고, 비교를 위한 2차원 V_2O_5 박막의 전극도 제작하였다. Raman 분석을 통해 증착한 박막 및 나노구조물 모두 V_2O_5 상을 갖는 것을 확인하였고, FE-SEM 이미지를 통해 3차원 V_2O_5 나노구조물이 비교적 높은 비표면적을 갖는 것을 확인하였다. 높은 비표면적을 갖는 3차원 V_2O_5 나노구조물을 기반으로 전고체 전지를 제작한다면, 고성능 전고체 전지의 제작이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김기출, "에너지 저장과 전기자동차를 위한 리튬이온배터리 기술 및 소재 공급망을 고려한 리뷰", 한국과학기술학회논문지, 제25권, 제12호, 2024.
- [2] Paul Albertus et al., "Challenges for and Pathways toward Li-Metal-Based All-Solid-State Batteries", ACS Energy Letters, Vol. 6, March, 2021.
- [3] Aniruddha Joshi et al., "A comprehensive review of solid-state batteries", Applied Energy, Vol. 386, No. 125546, May, 2025.

- [4] M. Rosa Palacín, "Recent advances in rechargeable battery materials: a chemist's perspective", Chemical Society Reviews, Vol. 38, pp. 2565–2575, June, 2009.
- [5] 이민규, 김기출, "높은 전기화학적 특성을 위한 자기조립적 3D V_2O_5 나노구조의 최적 스퍼터링 조건", 한국산화기술학회논문지, 제26권, 제3호, 2025.
- [6] Petr Shvets et al., "A review of Raman spectroscopy of vanadium oxides", Journal of Raman Spectroscopy, Vol. 50, pp. 1226–1244, May, 2019.