



니켈 폼(Ni foam)에 수열 합성법으로 제조한 수산화니켈(Ni(OH)₂) 전극의 구조적 및 전기적 특성

차현진^a, 이석희^a, 박정환^a, 손영국^a, 황동현^{b,*}

^a부산대학교 재료공학과, ^b신라대학교 배터리학과

Structural and Electrical Properties of Nickel Hydroxide Electrode Prepared by Hydrothermal Synthesis on Nickel Foam

Hyunjin Cha^a, Seokhee Lee^a, Jeonghwan Park^a, Young-Guk Son^a, Donghyun Hwang^{b,*}

^a School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

^b Department of Batteries Science and Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

(Received 30 August, 2023 ; revised 11 October, 2023 ; accepted 24 October, 2023)

Abstract

In this study, the nickel hydroxide (Ni(OH)₂) electrode for supercapacitor was prepared via hydrothermal method. Based on the nickel (Ni) foam, the electrode does not require any additional binder material or post-processing. Nickel nitrate (Ni(NO₃)₂) and hexamethylenetetramine (C₆H₁₂N₄) were used for synthesis, and the synthesis condition was 12 hours at 80 °C. X-ray diffraction (XRD) and field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) were used to analyze the structural characteristics of the electrode, and it shown that the nickel hydroxide was successfully prepared after only the one-step hydrothermal synthesis. The electrochemical properties were analyzed through the half-cell test. The prepared electrode shown a pair of oxidation/reduction peaks, indicating that the driving method included the redox reaction on the electrode surface. After the charge/discharge test, the specific capacitance was calculated as the value of 438 F/g at 3 A/g.

Keywords : Hydrothermal synthesis; Nickel hydroxide; Nickel foam; Supercapacitor.

1. 서 론

전세계적으로 무분별한 화석연료(fossil fuels)의 사용으로 인해 축적되어진 심각한 환경문제를 해결하기 위한 많은 노력들이 진행되고 있다. 화석연료의 사용을 줄이기 위한 가장 유망한 방법은 대체 에너지 자원(energy sources)을 찾는 것이다. 태양광(solar), 지열(geothermal), 풍력(wind), 바이오매

스(biomass), 수력(hydropower)과 같은 재생 가능 에너지(renewable energy)가 대표적인 대체 에너지 자원으로 분류된다 [1-3]. 이러한 재생에너지 자원에서는 발전된 전력(electric power)을 보다 효율적으로 활용하기 위해 생성된 에너지를 저장해 두었다가 필요한 시간에 공급할 수 있는 에너지 저장 시스템(energy storage system, ESS)의 역할이 매우 중요하다 [4-6].

슈퍼커패시터(supercapacitor, SC)는 높은 전력 밀도(high power density), 긴 수명(long lifespan), 넓은 작동 범위(wide operating range)

*Corresponding Author: Donghyun Hwang
Department of Batteries Science and Engineering,
Silla University
Tel: Fax: +82-51-999-5800
E-mail: dhhwang@silla.ac.kr

및 빠른 충-방전 속도(charge-discharge rate)와 같은 고유 특성으로 인해 ESS 분야 응용에 적합한 장치(devices)이다 [7-9]. 슈퍼커패시터는 그 작동원리에 따라 전기 이중층 커패시터(electric double layer capacitor, EDLC)와 유사커패시터(pseudocapacitor)로 구분된다 [10]. 전기 이중층 커패시터는 전기적 인력(electrical attraction)에 의해 이온(ions)이 전극 표면(surface)에 물리적으로 흡착되어 전기 이중층을 형성하고, 형성된 이중층에 전기가 저장되는 원리를 가진다. 따라서 표면적(surface area)이 넓은 재료일수록 더 많은 전기를 저장할 수 있으며, 넓은 표면적을 생성시키기 위한 소재로는 탄소(Carbon, C)가 많이 활용된다 [11]. 유사커패시터의 경우 전극표면에서의 산화환원 반응(redox reaction)을 수반하여 전기를 저장하며, 이러한 특성을 보이는 산화이리듐(Iridium(IV) oxide, IrO_2), 산화루테튬(Ruthenium(IV) oxide, RuO_2), 이산화망간(Manganese(IV) oxide, MnO_2), 수산화니켈(Nickel(II) hydroxide, Ni(OH)_2) 등이 전극물질로서 주로 연구되었다 [12-14]. 그 중에서도 Ni(OH)_2 은 높은 이론 정전용량(capacitance), 비교적 낮은 가격, 전기화학적 산화환원 반응의 안정성 등의 장점으로 인해 차세대 슈퍼커패시터용 전극 물질로 각광받고 있다 [15,24].

슈퍼커패시터 전극은 화학적 침전법(chemical precipitation), 솔-젤법(sol-gel method), 전기 증착법(electrochemical deposition) 및 수열 합성법(hydrothermal synthesis) 등과 같은 다양한 방법으로 제조된다 [16-19]. 이러한 제조 방법 중에서 수열 합성법은 밀폐된 용기에 합성용액을 넣은 후, 온도 및 시간 등의 공정 조건을 최적화하여 전극 물질을 합성하는 방법이다. 공정 과정에서 높은 압력을 수반하기에 비교적 저온에서 물질을 합성하기에 용이한 장점이 있다 [19-21]. 특히, 수산화니켈의 경우 수열합성을 통해 나노 벽(nanowall) 형태와 같은 넓은 표면적을 가지는 구조를 성공적으로 성장시킨 여러 연구결과가 보고되었다 [26,27]. 전극의 기판(substrate) 역할을 수행하는 전도성 지지체(conductive support) 또한 슈퍼커패시터 전극의 특성을 개선할 수 있는 중요한 요소이다. 니켈 폼(Nickel foam)은 니켈금속이 3차원(3D) 스캐폴드(scaffold) 형태로 상호 연결된 다공성 구조체

(porous structure)로서 평면 형태의 니켈 금속판보다 넓은 표면적을 제공할 수 있다 [22]. 이러한 특성으로 전극-전해질(electrode-electrolyte) 간 접촉 면적을 넓게 가져감으로써 더 많은 표면 반응(surface reaction)이 일어날 수 있게 해준다 [21,23]. Ni(OH)_2 을 니켈 폼 위에 증착 시킨 형태의 전극을 제조하기 위한 다양한 공정 및 니켈 염(Nickel salt)과 추가 물질(additives)들로 합성된 Ni(OH)_2 소재 특성에 관한 많은 연구가 보고되었다. 그러나, 질산니켈 6수화물(Nickel(II) nitrate hexahydrate, $\text{Ni(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)과 헥사메틸렌테트라민(Hexamethylenetetramine, HMT, $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$)을 수열 합성하여 제조한 Ni(OH)_2 전극의 비교적 낮은 정전용량(225F/g)은 개선할 필요가 있다 [28-32].

본 연구에서는 수열 합성법을 활용하여 기판 위에 전극 활물질을 직접 증착하는 형태의 슈퍼커패시터용 전극을 제조하였다. 이러한 방법은 활물질을 제조한 후, 바인더 등의 물질과 따로 혼합하여 전극 기판에 결합하는 별도의 공정 없이 기판에 바로 증착할 수 있는 장점이 있다. 특히, 니켈 폼과 같은 복잡한 구조를 가지는 기판 표면에도 활물질이 성공적으로 성장할 수 있음을 확인하였다. 질산니켈과 HMT를 사용하여 니켈 폼 표면에 Ni(OH)_2 를 합성하였고, 제조된 Ni(OH)_2 전극의 구조적 특성(structural properties)과 표면의 형태(morphology), 그리고 전기적 특성(electrical properties)을 분석하였다.

2. 실험 방법

수열합성을 위해 질산니켈 6수화물(Nickel(II) nitrate hexahydrate, $\text{Ni(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 헥사메틸렌테트라민(Hexamethylenetetramine, HMT, $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$), 증류수(distilled water)가 사용되었다. 활 물질(active material)이 증착 될 전극 기판으로 니켈 폼(nickel foam)을 준비하였다(순도 99.9%, 공극 48%). 우선 니켈 폼을 아세톤(acetone), 에탄올(ethanol), 증류수로 각각 10분씩 초음파세척기(ultrasonicator)로 세척하였다. 다음으로 2mmol의 질산니켈 6수화물과 HMT 4mmol을 35ml의 증류수에 첨가하여 수열 합성용 용액(solution)을 제조하였다. 합성에 함께 사용되는 HMT는 수열합성 과정에서 아래의 식(1), (2)과 같이 OH^- 를 제공해주고, 제공된 OH^-

는 최종적으로 수산화니켈(Nickel(II) hydroxide, $\text{Ni}(\text{OH})_2$)을 형성하는데 사용된다 [14].



앞서 세척한 니켈 폼과 합성 용액을 50ml 용량의 테플론 용기(Teflon-lined autoclave)에 넣고 80°C의 온도에서 12시간 동안 수열합성을 진행하였다. 수열합성이 끝난 샘플은 증류수로 10분간 초음파세척 하였고, 활 물질의 질량(mass of active material) 측정을 위해 60°C 온도의 오븐(oven)에서 12시간 동안 건조하였다. 니켈 폼 위에 합성된 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 의 결정구조(crystal structure)는 Cu-K α ($\lambda = 1.541\text{\AA}$) 소스를 갖는 X-선 회절(X-ray diffraction; XRD, Rigaku, Ultima IV) 분석법으로 40kV의 전압과 40mA의 전류를 인가한 조건에서 5°에서부터 80°까지의 2θ 회절 각도 범위에서 측정하였다. 제조된 전극의 표면은 전계-방출형 전자주사현미경(field-emission scanning electron microscopy, FE-SEM, TESCAN, MIRA3)으로 관찰하였다. 전기화학적 특성(electrochemical properties)은 3전극 셀(3-electrode cell) 측정 시스템(system)으로 분석하였다. 3전극 셀 측정 시스템을 구축하기 위해 작업 전극(working electrode)으로 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 전극을, 상대 전극(counter electrode)으로 백금(Pt) 전극을, 기준

전극(reference electrode)으로 Hg/HgO를, 그리고 1M의 KOH용액을 전해질로 사용하였다. 구성된 3전극 셀로 총 2가지 방법의 하프 셀(Half-cell) 테스트를 수행하였다. 첫번째로 순환전압전류법(cyclic voltammetry, CV test)으로 10mV/s에서 50mV/s 범위의 스캔 속도(scan rate) 조건에서 샘플의 CV 값을 측정하였고, 두번째로 정전류 충전-방전법(galvanostatic charge-discharge, GCD test)으로 3A/g에서 15A/g 범위의 다양한 전류밀도(current density) 조건에서 방전 시간(discharge time)을 측정한 후, 샘플의 비정전용량(specific capacitance)을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 수열 합성법으로 제조한 수산화니켈($\text{Ni}(\text{OH})_2$)의 결정 구조를 X선-회절(XRD)로 분석한 결과이다. $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 시편의 주요 피크는 회절 각도 13.4°, 17.9°, 20.2°, 25.3°, 33.8°, 36.2°, 38.9°, 44.6°, 51.6°, 59.5°, 69.8°에서 관찰되었다. 여기서, 회절 각도를 기준으로 13.4°, 17.9°, 25.3°, 33.8°, 59.5°에 위치한 회절 피크는 각각 α - $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (JCPDS No. 38-0715) 결정 구조의 (003), (100), (006), (101), (110) 면에 일치하는 것을 확인하였고, 그림 1에 별 모양으로 표시하였다 [13,25]. 회절 각도 20.2°, 33.8°, 38.9°, 59.5°, 69.8°에 위치한 회절 피크는 각각 β - $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (JCPDS No.14-0117) 결정 구조

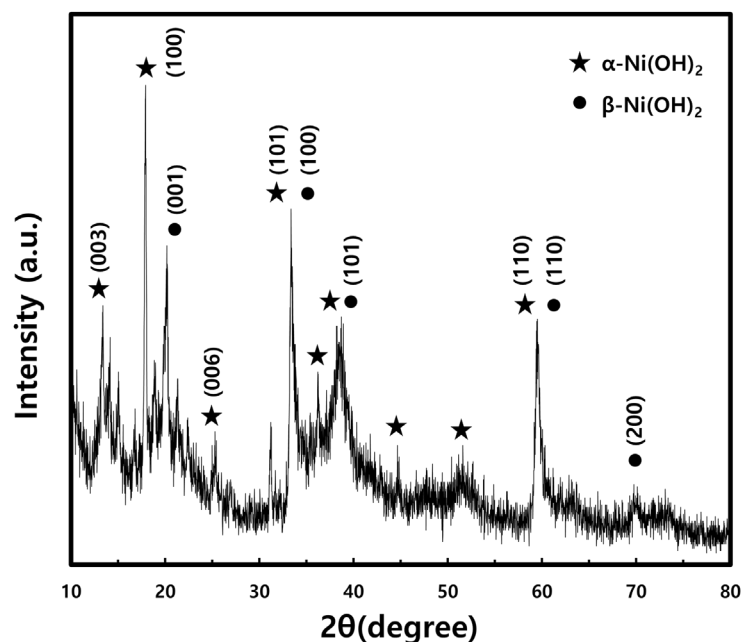


Fig. 1. XRD pattern of $\text{Ni}(\text{OH})_2$ powder prepared by hydrothermal synthesis.

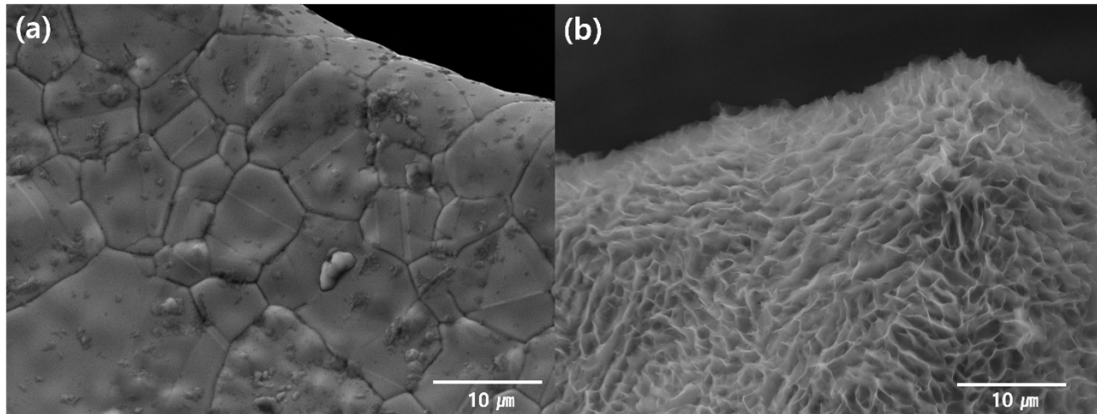


Fig. 2. FE-SEM images of the surfaces of (a) pure nickel foam, and (b) Ni(OH)_2 electrode prepared by hydrothermal synthesis.

의 (001), (100), (101), (110), (200) 면에 정확히 대응하였고, 이를 그림 1에 원 모양으로 나타내었다 [27,28]. 이러한 분석 결과를 통해 본 연구에서 제시한 실험 조건에서의 수열합성 공정으로 α - Ni(OH)_2 와 β - Ni(OH)_2 구조의 Ni(OH)_2 이 합성되었음을 확인하였다.

그림 2는 순수한 니켈 폼(pure Ni foam) 표면(a)과 니켈 폼 위에 합성된 수산화니켈(Ni(OH)_2) 전극의 표면(b)을 전계-방출형 전자주사현미경(FE-SEM)으로 관찰한 이미지이다. 그림 (a)와 (b)의 이미지 비교를 통해 수열 합성한 Ni(OH)_2 전극의 표면이 나노 벽(nano-wall)과 같은 형상으로 성장되었음을 확인하였다. 이와 같은 형상은 유사 연구에서 보고된 Ni(OH)_2 전극의 표면 나노 구조 모습과도 잘 일치하였다 [26,27]. 이러한 형상 구조를 평면 형태의 구조와 비교했을 때, 넓은 표면적(surface area)을 제공할 수 있으며 표면에서의 더 많은 산화환원 반응(redox reaction)을 발생시켜 결과적으로 더 높은 비정전용량(specific capacitance) 또는 출력밀도(power density)를 제공할 수 있다 [14].

그림 3은 제조된 수산화니켈(Ni(OH)_2) 전극을 순환전압전류법(CV)으로 측정한 그래프이다. 측정된 CV 그래프의 형태를 통해 전극의 구동방식(working principle)을 알 수 있다 [25]. CV 특성은 0.0V ~ 0.6V 범위의 전압 전위(potential window) 및 10mV/s, 20mV/s, 30mV/s, 40mV/s, 50mV/s의 다양한 스캔 속도(scan rate) 조건에서 측정되었다. 측정된 CV 그래프를 분석하여 Ni(OH)_2 전극의 산화/환원 피크(oxidation/reduction peak)가 각각 0.42V 및 0.54V에서 생성되는 것을 확인하였다. 이는 제조된 Ni(OH)_2 전극의 구동방식이 수산화칼륨(KOH) 전해질 내에서 산화환원 반응(redox reaction)을 수반함을 의미한다 [25, 34]. 이때, 표면에서 일어나는 반응은 다음 식으로 표현할 수 있다 [18].



스캔 속도가 증가함에 따라 산화환원 피크 및 CV 그래프의 면적은 증가하지만, 산화환원 피크의 형태와 전압 위치는 일정하게 유지되는 것을

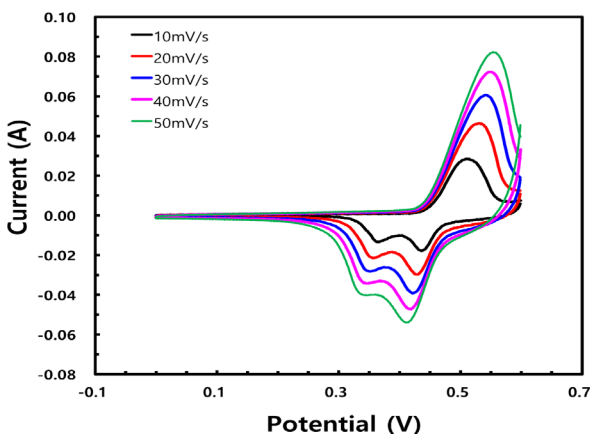


Fig. 3. CV curves of Ni(OH)_2 electrode measured at various scan rates (10 to 50 mV/s).

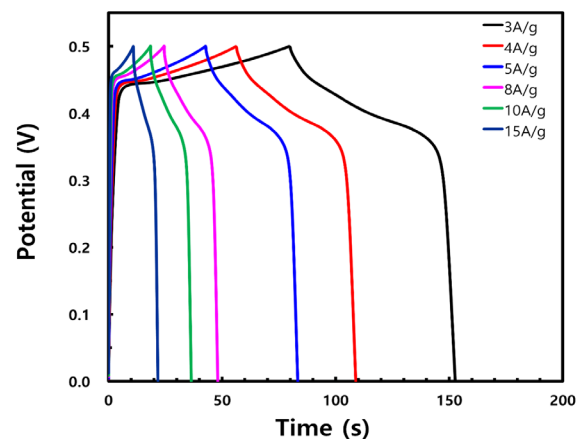


Fig. 4. GCD curves of Ni(OH)_2 electrode measured at various current densities (3 to 15 A/g).

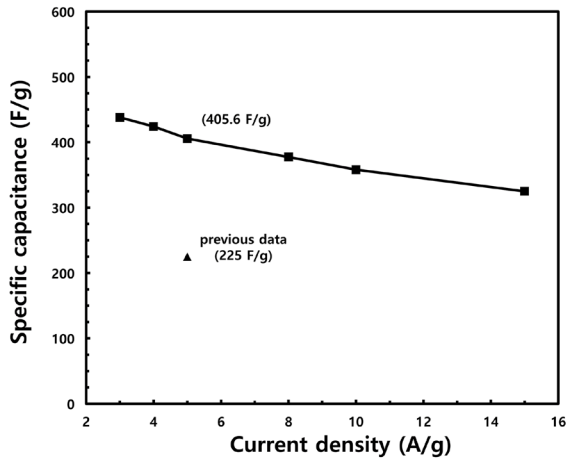


Fig. 5. Specific capacitance of Ni(OH)₂ electrode calculated from GCD curve at various current densities.

확인하였다. 이는 전극 표면에서 가역적 산화환원 반응(faradaic redox reaction)을 하는 유사커패시터 전극의 거동 특징으로 볼 수 있다 [27].

그림 4는 제조된 수산화니켈(Ni(OH)₂) 전극을 전압 전위(potential) 0.0V ~ 0.5V의 범위에서 각각 3A/g, 4A/g, 5A/g, 8A/g, 10A/g, 15A/g의 전류 밀도로 측정된 정전류 충-방전(GCD) 결과 그래프이다. 측정된 GCD 그래프의 모양은 전기 이중층 커패시터(EDLC) 전극에서 주로 나타나는 선형(linear) 형태가 아닌, 유사커패시터 전극의 전형적인 그래프 특성을 보여준다 [33,34]. GCD 측정 값을 기반으로 Ni(OH)₂ 전극의 비정전용량을 식(4)를 이용하여 다음과 같이 계산하였다 [23].

$$C = (I \times \Delta t) / (m \times \Delta V) \quad (4)$$

여기서, C(F/g)은 비정전용량(specific capacitance), I(A)는 전류(current), Δt (s)는 방전 시간(discharge time), ΔV (V)는 기전력(electromotive force), m(g)은 활 물질 질량(mass active material)에 해당한다. 식(4)를 사용하여 계산한 수산화니켈(Ni(OH)₂) 전극의 비정전용량 분석 결과를 그림 5에 나타내었다. 제조된 Ni(OH)₂ 전극의 정전용량은 전류 밀도 3A/g, 4A/g, 5A/g, 8A/g, 10A/g, 15A/g 조건에서 각각 438F/g, 424F/g, 405.6F/g, 377.4F/g, 358F/g, 324.9F/g으로 계산되었다. 특히, 5A/g의 전류 밀도에서 계산된 비정전용량(405.6F/g)은 이와 유사한 방법으로 제조된 Ni(OH)₂ 전극에서 보고된 비정전용량 값인 225F/g보다 1.8배 정도 더 우수한 결과를 보여주었다 [32].

4. 결론

본 연구에서는 수열 합성법을 사용하여 수산화니켈(Ni(OH)₂) 전극(electrode)을 니켈 폼 위에 합성하였고, 제조된 Ni(OH)₂ 전극의 구조적 특성과 표면 형태 및 전기적 특성을 분석하였다. XRD 분석으로 니켈 폼 위에 합성된 물질이 α -Ni(OH)₂와 β -Ni(OH)₂의 상을 갖는 Ni(OH)₂ 결정 구조임을 확인하였다. FE-SEM 이미지 분석을 통해 Ni(OH)₂ 전극의 표면에서 나노 벽과 같은 표면 구조를 관찰하였다. 이와 같은 형상은 이미 보고된 유사 연구에서 관찰된 Ni(OH)₂ 전극 표면의 나노 구조 모습과도 잘 일치하였다. CV 테스트를 통해 측정된 그래프는 0.0V ~ 0.6V의 전압전위에서 10 ~ 50mV/s로 변화하는 스캔 속도에도 일정한 산화환원 피크를 보여주었다. 이를 통해 제조된 전극이 가역적 산화환원 반응을 수반하는 유사커패시터 전극 거동을 가지는 것을 확인할 수 있었다. GCD 테스트를 통해 측정된 그래프의 모양을 분석하였을 때, 선형적인 EDLC 전극의 모양과는 확실히 다른 유사커패시터 전극의 그래프 형태를 나타내었다. 측정된 방전시간으로 비정전용량을 계산한 결과, 제조된 수산화니켈 전극은 3A/g, 4A/g, 5A/g, 8A/g, 10A/g, 15A/g의 전류 밀도에 대응하여 각각 438F/g, 424F/g, 405.6F/g, 377.4F/g, 358F/g, 324.9F/g의 값을 가지는 것을 확인하였다. 결과적으로, 니켈 폼을 수열합성 과정에 포함시킨 간단한 공정만으로 슈퍼커패시터용 전극을 제조할 수 있었으며 비슷한 조건의 기존 연구 대비 높은 비정전용량 값을 갖는 결과를 도출하였다.

Acknowledgments

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Q. Abbas, M. R. C. Hunt, M. Mirzaeian, P. Hall, R. Raza, Current state and future prospects for electrochemical energy storage and conversion systems, *Energies*, 13 (2020) 13215847.
- [2] K. Krishnasamy, K.K. Purushothaman,

- Preparation and characterisation of MnS@ Mn₃O₄/C nanoflakes for hybrid supercapacitor applications, *Materials Technology*, 37 (2022) 63–70.
- [3] S. Zheng, Z. S. Wu, S. Wang, H. Xiao, F. Zhou, C. Sun, Graphene-based materials for high-voltage and high-energy asymmetric supercapacitors, *Energy Storage Materials*, 6 (2017) 70–97.
- [4] S. Zhai, K. Jin, M. Zhou, Z. Fan, H. Zhao, X. Li, Y. Zhao, F. Ge, Z. Cai, A novel high performance flexible supercapacitor based on porous carbonized cotton/zno nanoparticle/cus micro-sphere, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 584 (2020) 124025.
- [5] W. H. Khoh, B. H. Wee, J. D. Hong, High performance flexible solid-state asymmetric supercapacitor composed of a polyaniline/pedot/polyaniline/ultralarge reduced graphene oxide tetralayer film and a pedot/MoS₂ composite film, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 581 (2019) 123815.
- [6] J. W. Choi, D. Aurbach, Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities, *Nature Reviews Materials*, 1 (2016) 1–16.
- [7] S. W. Zhang, B. S. Yin, X. X. Liu, D. M. Gu, H. Gong, Z. B. Wang, A high energy density aqueous hybrid supercapacitor with widened potential window through multi approaches, *Nano Energy*, 59 (2019) 41–49.
- [8] C. Zhao, W. Zheng, A review for aqueous electrochemical supercapacitors, *Frontiers in Energy Research*, 3 (2015) 23.
- [9] W. S. Li, Y. C. Shih, H. C. Cheng, Green synthesis of CNTs/Ni(OH)₂ nanostructures for electrochemical supercapacitors, *Chemical Physics Letters*, 750 (2020) 137499.
- [10] K. Naoi, W. Naoi, S. Aoyagi, J. i. Miyamoto, T. Kamino, New generation “nanohybrid supercapacitor”, *Accounts of Chemical Research*, 46 (2013) 1075–1083.
- [11] H. G. Jo, D. Y. Shin, H. J. Ahn, Mesoporous control effect of porous carbon nanofibers for electrical double-layer capacitors, *Korean Journal of Materials Research*, 29 (2019) 167–174.
- [12] K. Sharma, A. Arora, S. K. Tripathi, Review of supercapacitors: Materials and devices, *Journal of Energy Storage*, 21 (2019) 801–825.
- [13] D. S. Hall, D. J. Lockwood, C. Bock, B. R. MacDougall, Nickel hydroxides and related materials: A review of their structures, synthesis and properties, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 471 (2015) 20140792.
- [14] Y. Ma, M. Yang, X. Jin, Formation mechanisms for hierarchical nickel hydroxide microstructures hydrothermally prepared with different nickel salt precursors, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 588 (2020) 124374.
- [15] Y. Wang, B. Shang, F. Lin, Y. Chen, R. Ma, B. Peng, Z. Deng, Controllable synthesis of hierarchical nickel hydroxide nanotubes for high performance supercapacitors, *Chemical Communications*, 54 (2018) 559–562.
- [16] K. Jurewicz, S. Delpeux, V. Bertagna, F. Beguin, E. Frackowiak, Supercapacitors from nanotubes/polypyrrole composites, *Chemical Physics Letters*, 347 (2001) 36–40.
- [17] T. Y. Wei, C. H. Chen, H. C. Chien, S. Y. Lu, C. C. Hu, A cost-effective supercapacitor material of ultrahigh specific capacitances: Spinel nickel cobaltite aerogels from an epoxide-driven sol-gel process, *Advanced materials*, 22 (2010) 347–351.
- [18] G. R. Fu, Z. A. Hu, L. J. Xie, X. Jin, Y.

- L. Xie, Y. X. Wang, Z. Y. Zhang, Y. Y. Yang, H. Y. Wu, Electrodeposition of nickel hydroxide films on nickel foil and its electrochemical performances for supercapacitor, *International Journal of Electrochemical Science*, 4 (2009) 1052-1062.
- [19] Z. Li, W. Zhang, Y. Su, H. Wang, B. Yang, Effect of reaction temperature and time on the electrochemical properties of nickel hydroxide nanosheets, *Applied Surface Science*, 383 (2016) 268-275.
- [20] N. Maheswari, G. Muralidharan, Controlled synthesis of nanostructured molybdenum oxide electrodes for high performance supercapacitor devices, *Applied Surface Science*, 416 (2017) 461-469.
- [21] D. Lee, N. Shinde, J. C. Ding, J. Fu, R. K. Sahoo, H. W. Lee, J. M. Yun, H. Shin, K. Kim, Improvement of electrical performance by surface structure of Ni-material as a high-performance asymmetric supercapacitor electrode, *Ceramics International*, 46 (2020) 11189-11197.
- [22] N. A. Salleh, S. Kheawhom, A. A. Mohamad, Characterizations of nickel mesh and nickel foam current collectors for supercapacitor application, *Arabian Journal of Chemistry*, 13 (2020) 6838-6846.
- [23] X. Yi, H. Sun, N. Robertson, C. Kirk, Nanoflower Ni(OH)₂ grown in situ on ni foam for high-performance supercapacitor electrode materials, *Sustainable Energy & Fuels*, 5 (2021) 5236-5246.
- [24] A. Kumar Mondal, D. Su, S. Chen, B. Sun, K. Li, G. Wang, A simple approach to prepare nickel hydroxide nanosheets for enhanced pseudocapacitive performance, *RSC Advances*, 4 (2014) 19476-19481.
- [25] J. Yan, Z. Fan, W. Sun, G. Ning, T. Wei, Q. Zhang, R. Zhang, L. Zhi, F. Wei, Advanced asymmetric supercapacitors based on Ni(OH)₂/graphene and porous graphene electrodes with high energy density, *Advanced Functional Materials*, 22 (2012) 2632-2641.
- [26] M. Urso, G. Torrisi, S. Boninelli, C. Bongiorno, F. Priolo, S. Mirabella, Ni(OH)₂@ Ni core-shell nanochains as low-cost high-rate performance electrode for energy storage applications, *Scientific Reports*, 9 (2019) 7736.
- [27] Y. Liu, N. Liu, J. Hu, C. Xu, S. Wang, G. Du, In situ growth of Ni(OH)₂ nanoflakes on Ni foam as binder-free electrode for electrochemical pseudocapacitor, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 585 (2020) 012200.
- [28] Z. Lu, Z. Chang, W. Zhu, X. Sun, Beta-phased Ni(OH)₂ nanowall film with reversible capacitance higher than theoretical Faradic capacitance, *Chemical Communications*, 47 (2011) 9651-9653.
- [29] G. W. Yang, C. L. Xu, H. L. Li, Electrodeposited nickel hydroxide on nickel foam with ultrahigh capacitance, *Chemical Communications*, 48 (2008) 6537-6539.
- [30] B. Hu, X. Qin, A. M. Asiri, K. A. Alamry, A. O. Al-Youbi, X. Sun, Fabrication of Ni(OH)₂ nanoflakes array on Ni foam as a binder-free electrode material for high performance supercapacitors, *Electrochimica Acta*, 107 (2013) 339-342.
- [31] J. Cao, Z. Zhang, H. Li, R. Zhu, S. Li, L. Ma, Facile preparation of nickel hydroxide nanoplates on nickel foam for high performance hydrogen generation, *Sustainable Energy & Fuels*, 4 (2020) 5031-5035.
- [32] S. S. Waghmare, P. B. Patil, S. K. Baruva, M. S. Rajput, R. J. Deokate, S. H. Mujawar, Hydrothermal synthesis of β -Ni

- (OH)₂ and its supercapacitor properties, AIP Conference Proceedings, 1942 (2018) 140059.
- [33] J. H. Park, O. O. Park, K. H. Shin, C. S. Jin and J. H. Kim, An electrochemical capacitor based on a Ni(OH)₂/activated carbon composite electrode, Electrochemical and Solid-State Letters, 5 (2001) H7.
- [34] B. Akinwolemiwa, C. Peng and G. Z. Chen, Redox electrolytes in supercapacitors, Journal of the Electrochemical Society, 162 (2015) A5054.