

금속 염에 의한 콜로이드 NiO 나노 입자의 모양 조절

우호영* · 김민혜* · 백태종***†

*중앙대학교 융합공학과
06974 서울특별시 동작구 흑석로 84
**중앙대학교 지능형반도체공학과
06974 서울특별시 동작구 흑석로 84

(2024년 11월 25일 접수, 2024년 12월 26일 수정본 접수, 2025년 1월 7일 채택)

Shape Control of Colloidal NiO Nanoparticles by Metal Salts

Ho Young Woo*, MinHye Kim* and Taejong Paik***†

*School of Integrative Engineering, Chung-Ang University, 84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea
**Department of Intelligent Semiconductor Engineering, Chung-Ang University, 84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea
(Received 25 November 2024; Received in revised from 26 December 2024; Accepted 7 January 2025)

요 약

콜로이드계 무기 나노 입자는 반응 전구체의 종류, 반응 온도 및 반응 시간 등 합성 공정을 조절하여 나노 입자의 크기, 모양, 조성 및 결정 구조 등의 미세 구조 제어가 가능하다. 특히 나노 입자의 물리적, 광학적, 전기적 및 자기적 특성은 모양 및 결정 구조에 따라 결정되며 미세 구조 변화에 따라 특성을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 콜로이드 합성법을 통해 반응 변수를 조절하여 nickel oxide(NiO) 나노 입자의 모양 및 결정 구조를 제어하였다. 합성 공정에서 알칼리 금속을 첨가하고, 염의 종류 및 양을 조절하여 순수상의 NiO 결정 구조로 구성된 나노 입자를 제조하였으며, nanodots, nanoflowers 및 nanoplates의 모양 변화를 확인하였다. 이러한 결과를 통해 콜로이드 합성법으로 제조된 NiO 나노 입자는 전자 소자, 에너지 저장, 전기화학적 촉매 분야에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – Colloidal nanoparticles can be controlled in terms of size, shape, composition and crystal structure by adjusting reaction parameters such as the type of precursor, reaction temperature, and reaction time. In particular, the physical, optical, electrical, and magnetic properties of nanoparticles are determined by their microstructures which is manipulated by changing the structural parameters of nanoparticles. In this study, the morphology and crystal structure of NiO nanoparticles were controlled by adjusting reaction parameters during the synthetic procedure. Nanoparticles composed of NiO crystal structures were synthesized by controlling the types and amounts of metal salts, and the morphological variations of nanodots, nanoflowers, and nanoplates were observed. These results suggest that NiO nanoparticles synthesized by colloidal synthesis could possess specific crystal structures and be applicable as electronic devices, energy storage, and electrochemical catalysts.

Key words: Colloidal nanoparticles, Nickel oxide, Shape control

1. 서 론

용액 공정을 통해 합성되는 콜로이드 무기 나노 입자는 반응 온도, 반응 시간 및 반응 전구체의 종류와 같은 반응 변수를 조절하여 입자의 미세 구조의 제어가 가능하다[1-3]. 크기, 모양, 조성 및 결정 구조 등 미세 구조는 나노 입자의 물리적, 광학적, 전기적 및 자기적

특성을 결정하며, 나노 입자의 특성에 따라 광학[4], 생물의학[5,6], 전자 장치[7-9] 및 전기화학적 촉매[10, 11] 등 다양한 분야에 응용할 수 있다. 특히 전자 장치 및 촉매 연구 분야에서 나노 입자 기반 소재는 나노 입자의 미세 구조 및 도핑 여부에 따라 산화·환원 특성, 전하 이동도 및 금속성 등 전기화학적 특성이 변화하며, 높은 표면적, 미세 구조 제어와 가공성, 새로운 조성 및 구조 개발이 용이하다는 점에서 엄청난 잠재력을 가지고 있다.

Nickel oxide(NiO) 나노 입자는 일반적으로 고온 및 산화 조건에서 안정성이 높으며, 크기, 모양 및 결정성 등 미세구조를 제어하여 특정 응용 분야에 적합하게 물성을 최적화할 수 있다. 또한 NiO 나노 입자는 전자보다 정공의 농도가 더 높은 p형 반도체의 특성이 있으

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: paiktae@cau.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

며, 구체적인 전기적 성질은 결정 구조와 불순물의 유무에 따라 달라질 수 있다. 반도체적 특성으로 인해 촉매[12-14], 리튬 이온 배터리[15-17], 연료 전지[9,18], 태양 전지[19-21] 등의 응용분야에서 중요한 역할을 한다. NiO 나노 입자는 Ni^{2+} 및 Ni^{3+} 의 산화 상태 사이에서 가역적인 산화·환원 거동을 나타내는데, 이는 에너지 관련 응용 분야에서 필수적인 전자 전달을 가능하게 한다. 이를 통해 NiO 나노 입자는 리튬 이온 배터리의 전극 소재로 사용되어 높은 전하 저장 용량을 제공하고, 광전도 특성이 우수하여 태양 전지 및 물 분해 시스템에서 전자 수송층으로 활용된다. 또한 나노미터 규모의 NiO 나노 입자는 벌크 재료에 비해 표면적이 높고, 높은 표면적은 촉매 반응을 위한 더 많은 활성 부위를 제공한다. 이는 NiO 나노 입자의 반응성을 증가시키며, 수소화 및 탈수소화 반응, 메탄 개질, 일산화탄소 산화 등의 반응에 대한 촉매 성능을 증대한다.

NiO 나노 입자 합성 관련 연구는 하소법[22], 침전법[23,24], 수열 합성[25,26], 졸-겔법[27], 고온 열분해법[28,29]을 통해 보고되고 있으나, 나노 입자의 크기가 수 μm 이상이거나 크기 및 모양 균일도가 낮으며, 크기, 모양 및 결정 구조의 제어에 대한 연구는 한정적이다. 한편, 단분산계, 높은 크기 및 모양 균일도를 갖는 나노 입자의 합성에서 금속 올레이트(metal oleate)의 분해는 효과적인 수단으로 알려져 있다[30,31]. 특히 금속 산화물 나노 입자의 합성에서 금속 올레이트는 리간드 또는 계면활성제 역할을 하여 입자의 크기와 형태를 조절한다. 예를 들어, 올레이트의 농도를 증가하면 나노 입자의 성장 속도가 느려지고 입자 크기는 작아진다. 또한 올레이트는 입자의 표면에 결합하여 입자 간 응집을 방지하여 나노 입자의 표면을 안정화할 수 있다.

본 연구에서는 용액 상에서 금속 전구체의 분해하여 나노 입자를 합성하는 고온 열분해법을 이용하고, 합성 공정에서 알칼리 금속 염을 도입하여 NiO 나노 입자의 모양을 제어하는 합성법을 제시한다. Nickel의 반응 전구체는 oleic acid, octadecene 및 oleylamine의 유기 용매 하에 nickel oleate를 형성하고 높은 반응 온도에서 분해되어 단분산계 NiO 나노 입자를 형성하였다. 또한 나노 입자의 크기, 모양 및 결정 구조 등 물리적 특성을 제어할 수 있는 알칼리 금속 염의 종류 및 양을 조절하여 NiO 나노 입자의 형상을 제어하였다. 금속 염으로 lithium stearate를 사용할 경우 NiO 결정성의 nanodots 형태로 형성하였다. 또한 lithium stearate의 양을 조절하여 합성한 결과, 양이 감소함에 따라 nanodots이 응집하여 nanoflowers로 모양 변화를 확인하였다. 추가적으로 금속 염을 lithium hydroxide로 대체하면 NiO 결정성의 nanodots 및 nanoplates 형태의 나노 입자를 수득하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2-1. 재료

Lithium hydroxide(LiOH, 98%), oleic acid(OA, 90%), octadecene (ODE, 90%), oleylamine(OAm, 70%) 및 nickel(II) acetylacetonate (NiAcAc, 95%)의 반응 시약은 Sigma-Aldrich에서 구매하였다. Lithium stearate(LiSt, 90%)의 반응 시약은 Tokyo Chemical Industry Co., Ltd.에서 구매하였다. Toluene(99.5%) 및 methyl alcohol(MeOH, 99.5%)의 반응 시약은 Daejung Chemicals에서 구매하였다. 모든 시약은 추가적인 정제과정 없이 실험에 사용하였다.

2-2. 금속 염으로 lithium stearate를 사용한 NiO 나노 입자 합성

Lithium stearate를 사용한 NiO nanodots의 합성 과정은 다음과 같다. 125 mL 3구 둥근 바닥 플라스크에 LiSt 1.742 g(6 mmol), OA 12 mL 및 ODE 30 mL를 넣고 120 °C에서 30분 동안 진공을 유지하여 산소, 수분 및 불순물을 제거하였다. 이후, 반응 플라스크에 NiAcAc 0.2569 g(1 mmol) 및 OAm 18 mL을 넣고, 추가로 120 °C에서 1시간 30분 동안 진공을 유지하였다. 반응 플라스크 내부를 질소(N_2)로 충전하고 235 °C에서 30분 동안 반응을 진행하였다. Toluene 및 MeOH를 사용하여 반응 용액을 정제하고 최종적으로 toluene에 분산하여 나노 입자를 보관하였다.

2-3. 금속 염으로 lithium hydroxide를 사용한 NiO 나노 입자 합성

Lithium hydroxide를 사용한 NiO nanodots의 합성 과정은 다음과 같다. 125 mL 3구 둥근 바닥 플라스크에 LiOH 0.1437 g(6 mmol), OA 2 mL 및 ODE 30 mL를 넣고 120 °C에서 30분 동안 진공을 유지하여 산소, 수분 및 불순물을 제거하였다. 이후, 반응 플라스크에 NiAcAc 0.2569 g(1 mmol) 및 OAm 18 mL을 넣고, 추가로 120 °C에서 1시간 30분 동안 진공을 유지하였다. 반응 플라스크 내부를 질소(N_2)로 충전하고 300 °C에서 30분 동안 반응을 진행하였다. Toluene 및 MeOH를 사용하여 반응 용액을 정제하고 최종적으로 toluene에 분산하여 나노 입자를 보관하였다. 상기 합성 과정에서 유기 용매 OA의 양을 12 mL 사용하면 nanoplates 형태의 나노 입자를 수득하였다.

2-4. 특성 분석

나노 입자의 형태, 크기 및 표면 분석은 Carl Zeiss사의 SIGMA 모델을 사용한 Scanning electron microscopy(SEM)으로 수행하였으며, 가속 전압은 5 keV로 설정하였다. 또한 Transmission electron microscopy (TEM)은 200 kV의 가속 전압으로 JEOL사 JEM-F200모델을 활용하여 측정하였다. 나노 입자의 결정 구조를 파악하기 위해 X-ray diffraction (XRD)는 Bruker사 New D8-Advance모델을 사용하여 회절 각 30-90도의 범위에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

콜로이드상 나노 입자 합성에서 금속 염(metal salt)은 나노 입자의 크기, 모양, 결정 구조와 같은 물리적 특성을 제어하는데 중요한 역할을 한다[2,32]. 금속 염은 특정 결정 면에 대한 선택적 흡착을 유도, 반응 매질 내 이온 농도를 변화시켜 나노 입자의 성장 속도를 조절하며, 입자의 특정 방향에 대한 성장을 촉진하거나 억제한다. 이를 통해 나노 입자의 크기와 모양을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 염이 서로 다른 LiSt 및 LiOH를 사용하여 NiO 나노 입자의 합성 과정에서 금속 염의 영향을 조사하였다.

NiO 나노 입자의 합성은 OA, ODE 및 OAm의 유기 용매에서 nickel 금속 착물의 고온 열분해법을 통해 진행된다. 먼저 lithium stearate(LiSt) 또는 lithium hydroxide(LiOH)의 금속 염을 OA 및 ODE의 유기 용매에 용해하고, 120 °C에서 30분 동안 진공을 유지하여 반응에 영향을 줄 수 있는 산소, 수분 및 불순물을 제거한다. 이어서 nickel의 반응 전구체인 nickel(II) acetylacetonate(NiAcAc) 및 유기용매 OAm을 주입하고 추가로 120 °C에서 1시간 30분 동안 진공을 유지한다. 이후 반응 혼합물은 반응 온도를 승온하여 30분

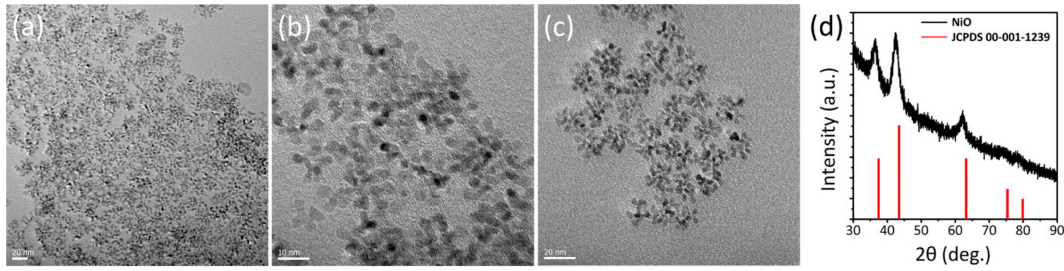


Fig. 1. TEM images of NiO NFs. (a, b) LiSt 6 mmol, and (c) LiSt 3 mmol. (d) XRD spectra of NiO NFs.

간 반응을 진행한다.

나노 입자의 형상 제어를 위해 LiSt를 금속 염으로 첨가하고, 235 °C의 반응 온도에서 30분 간 반응을 진행하면 nanodots(NDs)이 응집된 nanoflower(NFs) 형태의 나노 입자를 형성하였다. LiSt 6 mmol을 사용하여 합성한 NiO NFs의 저배율 및 고배율 TEM 이미지를 Fig. 1(a,b)에 나타내었다. NF 형태를 이루는 NiO NDs의 입자 크기는 약 3.5 ± 0.4 nm 크기로 확인하였다. LiSt의 양을 3 mmol로 줄여서 합성하여도 NiO NFs를 유지하는 것을 확인하였다 (Fig. 1(c)). 금속 염은 나노 입자의 표면 에너지 상태에 영향을 미쳐 입자 간 응집을 방지하고 안정화에 기여한다[2]. 또한 나노 입자의 표면을 구성하는 리간드는 입자의 모양과 성장거동을 제어할 뿐만 아니라 화학적 반응성, 분산성 및 안정성 등 입자의 성질을 결정하는 중요한 역할을 한다[33]. LiSt의 양이 3 mmol에서 6 mmol로 증가함에 따라 NiO NFs가 응집된 상태에서 NiO NDs의 분산된 상태로 변화하는 것은 LiSt가 금속 염의 역할과 더불어, LiSt의 긴 알킬 체인이 나노 입자 표면의 리간드 역할을 하여 입자간 분산 상태를 증가시키는 방향으로 작용한 것으로 판단된다. 결정 구조 분석을 위해 X-선 회절 분석 (XRD) 실험을 진행하였다. Fig. 1(d)는 NiO NFs의 XRD 분석 결과이다. 나노 입자는 NiO cubic(JCPDS 00-001-1239)의 단일 결정에서 나타나는 XRD 피크를 나타내고 있으며 다른 불순물에 의한 XRD 피크 존재하지 않은 것으로 보아 순수상의 NiO가 합성되었음을 확인할 수 있다.

합성 과정의 다른 절차는 동일하지만, 금속 염에 대해 LiSt를 같은 당량(6 mmol)의 LiOH로 대체하고, 유기 용매 OA를 2 mL로 줄여서 합성을 진행하였다. Ni 전구체 투입전 LiOH는 파우더 형태로 용매에 투입하고, 온도를 충분히 올려 OA와 착물을 형성하여 모두 용해될 때까지 기다린다. 이후 온도를 낮추고 Ni 전구체를 투입한 후 120 °C에서 진공 열처리를 통해 휘발성 유기물과 물을 제거하였다. 300 °C의 반응 온도에서 30분 간 반응을 진행하면 LiSt를 사용한 실험에서 나타났었던 NF 형태가 아닌 각각의 ND가 분리되어 있는

형태의 나노 입자를 형성하였다. Fig. 2(a,b)는 LiOH 및 OA 2 mL를 사용하여 합성한 NiO NDs의 저배율 및 고배율 TEM 이미지를 보여주며, 입자는 약 3.8 ± 0.5 nm 크기로 확인하였다. NiO NDs는 NiO cubic(JCPDS 00-001-1239)의 단일 결정성으로 나타나며 불순물에 의한 다른 회절 피크는 나타나지 않는 것으로 보아 순수상의 NiO가 합성되었음을 확인할 수 있다(Fig. 2(c)).

NiO 나노 입자의 형태는 용매의 양을 변경하여 조절 가능하다. 상기 LiOH를 금속 염으로 사용한 합성 조건에서 유기 용매 OA의 사용량을 12 mL로 증가하여 합성한 경우 nanoplates (NPs) 형태의 나노 입자를 제조하였다(Fig. 3). 나노 입자의 합성에서 OA는 나노 입자의 크기 및 모양을 제어하는 데 중요한 역할을 하며, 특히 OA는 특정 방향으로 성장 속도를 조절하여 다양한 모양의 나노 입자를 형성할 수 있게 한다[34,35]. LiOH를 금속 염으로 사용하여 NiO 나노 입자를 합성한 결과, OA의 양이 증가함에 따라 NiO NDs에서 NiO NPs로 변하는 형상 변화가 관찰되었다. 이 과정에서 OA는 캡핑제로 작용하여 NiO 나노 입자의 성장 방향을 조절하고 plate 형태의 성장을 유도한 것으로 판단된다. Fig. 3(a-c)는 저배율 및 고배율 TEM 이미지로, NiO NPs는 2개 이상의 plate가 적층된 구조임을 확인하였다. 입자 크기 분석 결과, 약 14.6 ± 2.8 nm 크기로, 제조한 NiO NPs가 매우 균일한 입자 크기 분포로 형성하였음을 분석하였다. NiO NPs의 원소 조성을 파악하기 위해 TEM/EDS mapping 분석을 진행한 결과를 Fig. 3(e,f)에 나타내었으며, 나노 입자의 형태를 따라 Ni 및 O 원소가 분포된 것을 확인하였다. LiOH는 OA와 착물을 형성하여 lithium oleate로 전환된다[36]. NiO 나노 입자의 모양 조절에서, 조절한 반응 변수인 금속 염의 종류(LiSt와 lithium oleate)는 알킬 체인 내 이중 결합의 유무를 제외하면 구조적으로 유사하다. 그러나, 카복실레이트 염의 구조적 차이는 용해도, 계면 상호작용, 또는 금속 이온과의 반응성에 미세한 차이를 유도할 수 있다 [37,38]. 이러한 차이는 나노 입자의 형성과 성장 과정에서 중요한 역할을 하며, 결과적으로 카복실레이트 염의 종류에 따라 다양한

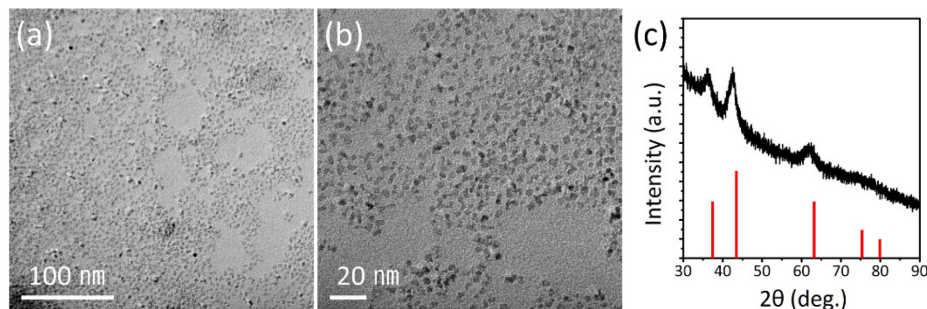


Fig. 2. (a) Low-magnification and (b) high-magnification TEM images of NiO NDs. (c) XRD spectra of NiO NDs.

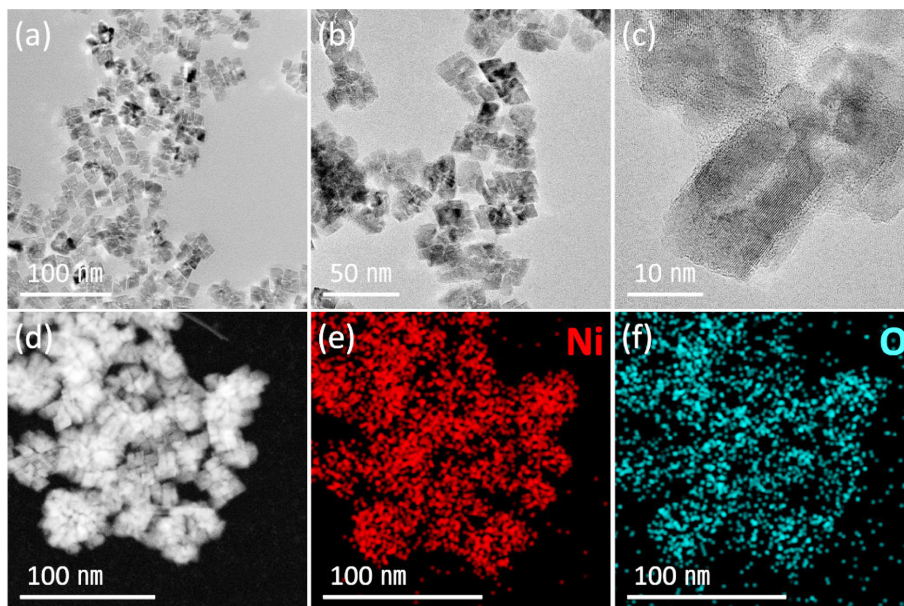


Fig. 3. (a, b) low-magnification and (c) high-magnification TEM images, (d) HAADF-STEM, and (e, f) EDS mapping images of NiO NPs.

모양, 크기, 결정구조의 나노 입자를 형성할 수 있다[39-41]. NiO 나노 입자의 합성에서 동일한 당량의 Li 금속 염을 사용했지만, LiSt는 nanodots 모양을 형성한 반면, LiOH는 nanoplates 모양을 형성하였다. 이는 NiO 나노 입자의 형상 변화에 카복실레이트 염의 화학적 특성과 반응성 차이가 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 반응 변수를 조절하여 NiO 나노 입자의 모양 및 결정 구조를 제어하였다. 유기 용매에서 nickel 금속 착물의 고온 열분해법을 통해 NiO 나노 입자를 제조하였으며, 염이 서로 다른 LiSt 및 LiOH를 사용하여 NiO 나노 입자의 합성 과정에서 금속 염의 영향을 조사하였다. NiO 결정성을 가진 NF 형태의 NiO 나노 입자는 금속 염으로 LiSt를 사용하여 제조하였다. 금속 염을 LiOH로 대체하는 경우 NiO 결정성을 가진 ND 형태의 NiO 나노 입자를 제조하였으며, 유기 용매 OA의 양을 조절하여 NP 형태로 모양 변화를 확인하였다. 이러한 모양 변화는 나노 입자의 성장거동에 OA가 리간드 역할로 작용하여 나노 입자의 성장을 억제 또는 촉진한 결과로 판단된다. 본 연구에서 제안하는 NiO 나노 입자는 특정한 결정 구조를 갖고 전자 장치 및 전기화학적 촉매에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

이 논문은 2022년도 중앙대학교 연구년 결과물로 제출됨.

References

1. Yin, Y. and Alivisatos, A. P., "Colloidal Nanocrystal Synthesis and the Organic-inorganic Interface," *Nature*, **437**, 664-670(2005).
2. Baig, N., Kammakam, I. and Falath, W., "Nanomaterials: A

- Review of Synthesis Methods, Properties, Recent Progress, and Challenges," *Mater. Adv.*, **2**, 1821-1871(2021).
3. Baek, W., Chang, H., Bootharaju, M. S., Kim, J. H., Park, S. and Hyeon, T., "Recent Advances and Prospects in Colloidal Nanomaterials," *JACS Au*, **1**, 1849-1859(2021).
4. García de Arquer, F. P., Talapin, D. V., Klimov, V. I., Arakawa, Y., Bayer, M. and Sargent, E. H., "Semiconductor Quantum Dots: Technological Progress and Future Challenges," *Science*, **373**, eaaz8541(2021).
5. Wang, X., Chen, H., Chen, Y., Ma, M., Zhang, K., Li, F., Zheng, Y., Zeng, D., Wang, Q. and Shi, J., "Perfluorohexane-encapsulated Mesoporous Silica Nanocapsules as Enhancement Agents for Highly Efficient High Intensity Focused Ultrasound (HIFU)," *Adv. Mater.*, **6**, 785-791(2012).
6. Mettenbrink, E. M., Yang, W. and Wilhelm, S., "Bioimaging with Upconversion Nanoparticles," *Adv. Photonics Res.*, **3**, 2200098(2022).
7. Shipway, A. N., Katz, E. and Willner, I., "Nanoparticle arrays on Surfaces for Electronic, Optical, and Sensor Applications," *ChemPhysChem*, **1**, 18-52(2000).
8. He, C., Wu, S., Zhao, N., Shi, C., Liu, E. and Li, J., "Carbon-encapsulated Fe₃O₄ Nanoparticles as a High-rate Lithium Ion Battery Anode Material," *ACS Nano*, **7**, 4459-4469(2013).
9. Jahromi, S. P., Pandikumar, A., Goh, B. T., Lim, Y. S., Basirun, W. J., Lim, H. N. and Huang, N. M., "Influence of Particle Size on Performance of a Nickel Oxide Nanoparticle-based Supercapacitor," *RSC Adv.*, **5**, 14010-14019(2015).
10. Peng, Z. and Yang, H., "Designer Platinum Nanoparticles: Control of Shape, Composition in Alloy, Nanostructure and Electrocatalytic Property," *Nano Today*, **4**, 143-164(2009).
11. Bansal, V., Li, V., O'Mullane, A. P. and Bhargava, S. K., "Shape Dependent Electrocatalytic Behaviour of Silver Nanoparticles," *CrystEngComm*, **12**, 4280-4286(2010).
12. Fominykh, K., Feckl, J. M., Sicklinger, J., Döblinger, M., Böcklein, S., Ziegler, J., Peter, L., Rathousky, J., Scheidt, E. W. and

- Bein, T., "Ultrasmall Dispersible Crystalline Nickel Oxide Nanoparticles as High-performance Catalysts for Electrochemical Water Splitting," *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 3123-3129(2014).
13. Gong, M., Zhou, W., Tsai, M.-C., Zhou, J., Guan, M., Lin, M.-C., Zhang, B., Hu, Y., Wang, D.-Y. and Yang, J., "Nanoscale Nickel Oxide/nickel Heterostructures for Active Hydrogen Evolution Electrocatalysis," *Nat. Commun.*, **5**, 4695(2014).
 14. Fominykh, K., Chernev, P., Zaharieva, I., Sicklinger, J., Stefanic, G., Döblinger, M., Müller, A., Pokharel, A., Böcklein, S. and Scheu, C., "Iron-doped Nickel Oxide Nanocrystals as Highly Efficient Electrocatalysts for Alkaline Water Splitting," *ACS Nano*, **9**, 5180-5188(2015).
 15. Long, H., Shi, T., Hu, H., Jiang, S., Xi, S. and Tang, Z., "Growth of Hierarchical Mesoporous NiO Nanosheets on Carbon Cloth as Binder-free Anodes for High-performance Flexible Lithium-ion Batteries," *Sci. Rep.*, **4**, 7413(2014).
 16. Khalil, A., Lalia, B. S. and Hashaikh, R., "Nickel Oxide Nanocrystals as a Lithium-ion Battery Anode: Structure-performance Relationship," *J. Mater. Sci.*, **51**, 6624-6638(2016).
 17. Kawade, U. V., Kadam, S. R., Kulkarni, M. V. and Kale, B. B., "Synergic Effects of the Decoration of Nickel Oxide Nanoparticles on Silicon for Enhanced Electrochemical Performance in LIBs," *Nanoscale Adv.*, **2**, 823-832(2020).
 18. Cai, G., Wang, X., Cui, M., Darmawan, P., Wang, J., Eh, A. L.-S. and Lee, P. S., "Electrochromo-supercapacitor Based on Direct Growth of NiO Nanoparticles," *Nano Energy*, **12**, 258-267(2015).
 19. Wang, K.-C., Jeng, J.-Y., Shen, P.-S., Chang, Y.-C., Diau, E. W.-G., Tsai, C.-H., Chao, T.-Y., Hsu, H.-C., Lin, P.-Y. and Chen, P., "P-type Mesoscopic Nickel Oxide/organometallic Perovskite Heterojunction Solar Cells," *Sci. Rep.*, **4**, 4756(2014).
 20. Liu, Z., Zhu, A., Cai, F., Tao, L., Zhou, Y., Zhao, Z., Chen, Q., Cheng, Y.-B. and Zhou, H., "Nickel Oxide Nanoparticles for Efficient Hole Transport in Pin and Nip Perovskite Solar Cells," *J. Mater. Chem. A*, **5**, 6597-6605(2017).
 21. Etefa, H. F., Imae, T. and Yanagida, M., "Enhanced Photosensitization by Carbon Dots Co-adsorbing with Dye on p-type Semiconductor (Nickel Oxide) Solar Cells," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 18596-18608(2020).
 22. Caballero, A., Hernán, L., Morales, J., González, Z., Sánchez-Herencia, A. and Ferrari, B., "A High-capacity Anode for Lithium Batteries Consisting of Mesoporous NiO Nanoplatelets," *Energy Fuels*, **27**, 5545-5551(2013).
 23. Abboud, M., Haija, M. A., Bel-Hadj-Tahar, R., Mubarak, A. T., Ismail, I. and Hamdy, M. S., "Highly Ordered Mesoporous Flower-like NiO Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Photocatalytic Performance," *New J. Chem.*, **44**, 3402-3411(2020).
 24. Mala, N. A., Dar, M. A., Rather, M. u. D., Reshi, B. A., Sivakumar, S., Batoo, K. M. and Ahmad, Z., "Supercapacitor and Magnetic Properties of NiO and Manganese-doped NiO Nanoparticles Synthesized by Chemical Precipitation Method," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **34**, 505(2023).
 25. Nail, B. A., Fields, J. M., Zhao, J., Wang, J., Greaney, M. J., Brutchey, R. L. and Osterloh, F. E., "Nickel Oxide Particles Catalyze Photochemical Hydrogen Evolution from Water-Nanoscaling Promotes P-Type Character and Minority Carrier Extraction," *ACS Nano*, **9**, 5135-5142(2015).
 26. Dhas, S. D., Maldar, P. S., Patil, M. D., Nagare, A. B., Waikar, M. R., Sonkawade, R. G. and Moholkar, A. V., "Synthesis of NiO Nanoparticles for Supercapacitor Application as an Efficient Electrode Material," *Vacuum*, **181**, 109646(2020).
 27. Alagiri, M., Ponnusamy, S. and Muthamizhchelvan, C., "Synthesis and Characterization of NiO Nanoparticles by Sol-gel Method," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **23**, 728-732(2012).
 28. Li, Y., Afzaal, M. and O'Brien, P., "The Synthesis of Amine-capped Magnetic (Fe, Mn, Co, Ni) Oxide Nanocrystals and Their Surface Modification for Aqueous Dispersibility," *J. Mater. Chem.*, **16**, 2175-2180(2006).
 29. Liang, X., Yi, Q., Bai, S., Dai, X., Wang, X., Ye, Z., Gao, F., Zhang, F., Sun, B. and Jin, Y., "Synthesis of Unstable Colloidal Inorganic Nanocrystals Through the Introduction of a Protecting Ligand," *Nano Lett.*, **14**, 3117-3123(2014).
 30. Park, J., An, K., Hwang, Y., Park, J.-G., Noh, H.-J., Kim, J.-Y., Park, J.-H., Hwang, N.-M. and Hyeon, T., "Ultra-large-scale Syntheses of Monodisperse Nanocrystals," *Nat. Mater.*, **3**, 891-895(2004).
 31. Hyeon, T., "Chemical Synthesis of Magnetic Nanoparticles," *Chem. Commun.*, 927-934(2003).
 32. Dikshit, P. K., Kumar, J., Das, A. K., Sadhu, S., Sharma, S., Singh, S., Gupta, P. K. and Kim, B. S., "Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: Applications and Limitations," *Catalysts*, **11**, 902(2021).
 33. Whitesides, G. M. and Grzybowski, B., "Self-assembly at All Scales," *Science*, **295**, 2418-2421(2002).
 34. Dinh, C.-T., Nguyen, T.-D., Kleitz, F. and Do, T.-O., "Shape-controlled Synthesis of Highly Crystalline Titania Nanocrystals," *ACS Nano*, **3**, 3737-3743(2009).
 35. Gao, G., Liu, X., Shi, R., Zhou, K., Shi, Y., Ma, R., Takayama-Muromachi, E. and Qiu, G., "Shape-controlled Synthesis and Magnetic Properties of Monodisperse Fe₃O₄ Nanocubes," *Cryst. Growth Des.*, **10**, 2888-2894(2010).
 36. Paik, T., Gordon, T. R., Prantner, A. M., Yun, H. and Murray, C. B., "Designing Tripodal and Triangular Gadolinium Oxide Nanoplates and Self-assembled Nanofibrils as Potential Multimodal Bioimaging Probes," *ACS Nano*, **7**, 2850-2859(2013).
 37. Nguyen, T.-D., "From Formation Mechanisms to Synthetic Methods Toward Shape-controlled Oxide Nanoparticles," *Nanoscale*, **5**, 9455-9482(2013).
 38. Spackova, J., Fabra, C., Mitteleite, S., Gaillard, E., Chen, C.-H., Cazals, G., Lebrun, A., Sene, S., Berthomieu, D. and Chen, K., "Unveiling the Structure and Reactivity of Fatty-acid Based (nano) Materials Thanks to Efficient and Scalable ¹⁷O and ¹⁸O-isotopic Labeling Schemes," *J. Am. Chem. Soc.*, **142**, 21068-21081(2020).
 39. Bronstein, L. M., Huang, X., Retrum, J., Schmucker, A., Pink, M., Stein, B. D. and Dragnea, B., "Influence of Iron Oleate Complex Structure on Iron Oxide Nanoparticle Formation," *Chem. Mater.*, **19**, 3624-3632(2007).
 40. Perton, F., Cotin, G., Kiefer, C., Strub, J.-M., Cianferani, S., Greneche, J.-M., Parizel, N., Heinrich, B., Pichon, B. and Mertz, D., "Iron Stearate Structures: An Original Tool for Nanoparticles Design," *Inorg. Chem.*, **60**, 12445-12456(2021).
 41. Kirkpatrick, K. M., Zhou, B. H., Bunting, P. C. and Rinehart, J. D., "Size-Tunable Magnetite Nanoparticles from Well-Defined Iron Oleate Precursors," *Chem. Mater.*, **34**, 8043-8053(2022).

Authors

Ho Young Woo: Ph.D. Candidate, School of Integrative Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Republic of Korea; whymca0@gmail.com

MinHye Kim: M.S. Graduate, School of Integrative Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Republic of Korea; mhkim6744@gmail.com

Taejong Paik: Associate Professor, School of Integrative Engineering, Department of Intelligent Semiconductor Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Republic of Korea; paiktae@cau.ac.kr