

높은 유효 표면적을 갖는 3차원 TiO₂ 나노벽 유사구조의 성장

김미리¹, 김기출^{1,2*}

¹목원대학교 지능정보융합학과, ²목원대학교 신소재화학공학과

Growth of 3D TiO₂ Nano-wall-like Structure with High Effective Surface Area

Mee-Ree Kim¹, Ki-Chul Kim^{1,2*}

¹Department of Intelligent Information Convergence, Mokwon University

²Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요약 높은 유효 표면적을 갖는 나노소재는 고감도 가스센서와 바이오센서 및 높은 촉매효율을 구현하는 기능성 소재로 활용되고 있다. 본 연구에서는 Ti Sheet와 Urea를 이용하는 Chemical Bath Deposition(CBD) 공정으로 기판에 수직 한 방향으로 성장하는, 높은 유효 표면적을 갖는 3차원 나노벽 유사구조의 Titanate Sheet를 합성하였다. CBD 공정에서 합성온도 및 합성시간 등을 조절하여 3차원 나노벽 유사구조의 최적 합성조건을 탐색하였다. 합성된 3차원 나노벽 유사구조의 Ammonium Titanate를 공기 중에서의 열처리 공정을 통하여 다양한 용도로 활용되는 TiO₂ 3차원 나노벽 유사구조로 변환시켰다. 연구결과 3차원 나노벽 유사구조의 Ammonium Titanate가 균일하게 성장되는 CBD 합성온도는 90 °C이었고, 550 °C 이상에서 3시간 열처리하였을 경우, 3차원 나노벽 유사구조의 TiO₂ 상으로 변환되었다. 특히 700 °C에서 열처리하였을 경우, Rutile 상이 우세한 TiO₂ 3차원 나노벽 유사구조를 얻을 수 있었다. 하지만 700 °C의 열처리에서는 3차원 나노벽의 가장자리가 손상되는 현상이 발생하였다.

Abstract Nano-materials with high effective surface areas have been applied to functional materials, such as high sensitive gas sensors and biosensors and high-efficiency catalytic materials. In this study, titanate sheets with a 3D nano-wall-like structure, high effective surface area, were synthesized vertically to the substrate by a chemical bath deposition (CBD) process using a Ti sheet and urea. The synthesis temperature and synthesis duration time were controlled to the optimal conditions of a 3D nano-wall-like structure in the CBD process. The synthesized ammonium titanate sheets with a 3D nano-wall-like structure were annealed in air to transform to TiO₂ with a 3D nano-wall-like structure for various applications. As a result, the optimal temperature in the CBD process for the synthesis of a uniform ammonium titanate sheet with a 3D nano-wall-like structure was 90 °C. TiO₂ with a 3D nano-wall-like structure was obtained from the ammonium titanate sheet with a 3D nano-wall-like structure by annealing above 550 °C for three hours. In particular, TiO₂ with a 3D nano-wall-like structure with a dominant rutile phase was obtained by post-annealing at 700 °C. On the other hand, damage to the 3D nano-wall edge was observed after 700 °C post-annealing.

Keywords : Chemical Bath Deposition, Hydrothermal, Nano-Wall, TiO₂, Vertical Growth

본 연구는 2020년도 산학협동재단의 지원을 받아 수행되었음. This work was supported by Korea Sanhak Foundation(KSF) in 2020.

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

email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received January 5, 2021

Revised March 24, 2021

Accepted April 2, 2021

Published April 30, 2021

1. 서론

반도체 공정기술이 발달하면서 미소 소자를 구현하는 다양한 기술이 개발되었고, 현재 반도체 공정기술은 수 nm 크기의 패턴을 구현할 수 있는 수준에 도달하였다. 4차 산업혁명의 시대에는 다양한 기능성 소자가 개발되고, 초소형 센서 및 디바이스에 기반한 사물인터넷(IoT, Internet of Things) 시대가 도래할 것으로 예상하고 있다. 하지만 모든 미소 소자를 톱-다운(Top-Down) 공정 기술인 고가의 반도체 공정기술로 구현하는 것은 소자의 가격을 상승시키는 요인이 된다. 따라서 원자의 자기조립적 메커니즘(Self-Assembled Mechanism)에 기초한 저가의 버텀-업(Bottom-Up) 소재합성 기술이 주목을 받고 있다[1]. 다양한 나노소재에 대하여 연구가 폭넓게 수행되고, 나노구조의 소재에 대한 이해가 깊어지면서 버텀-업 공정에 기반한 나노구조의 소재합성 기술이 보고되었다[2-11]. 벌크(Bulk) 소재와 비교하여 나노구조의 소재는 유효 비표면적이 매우 크기 때문에 반응성이 매우 높아서 고감도의 가스센서 및 바이오센서의 제작이 가능하고, 높은 촉매효율을 구현할 수 있다. 또한 형상이 제어된 나노소재는 작은 체적에 많은 에너지를 저장할 수 있는 차세대 배터리 기술에도 적용이 가능할 것으로 주목을 받고 있다[1].

기판의 선택적 영역에 나노구조물을 원자의 자기조립적 공정으로 성장시키는 다양한 기술이 연구되었고, 미세 접촉인쇄(Micro-Contact Print) 기술[2-4], 나노 임프린트(Nano-Imprint) 기술[5], 원자층 증착(Atomic Layer Deposition) 기술[3,4], 이차 스퍼터링 리소그라피(Secondary Sputtering Lithography) 기술[6] 등이 다양한 조합으로 연계되어 선택적 영역에 다양한 나노구조물을 버텀-업 공정으로 합성하고 있다. 하지만 이러한 기술들도 버텀-업 공정의 자기조립적 메커니즘을 활용하고 있지만 일부는 고가의 톱-다운 반도체 공정기술을 활용하고 있다.

높은 유효 비표면적을 갖는 3차원 나노벽 유사 구조의 나노소재를 저가의 버텀-업 자기조립적 공정으로 합성하는 Chemical Bath Deposition(CBD) 공정이 다양한 금속 산화물 소재에 대하여 적용되었고, 성공적으로 3차원 나노벽 유사구조가 합성되었음을 보고하였다[7-11]. CBD 공정은 합성 전구체의 농도, 전구체간의 비율, 합성 온도, 합성시 pH, 합성 시간, 기판 등의 변수를 조절하여 3차원 나노벽 유사구조를 저가로 합성할 수 있다[7-11].

이산화티타늄(TiO₂)은 저렴하고, 독성이 없으며 상이

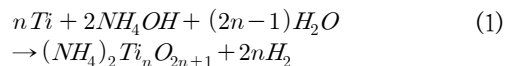
안정하고, 높은 광촉매 효과를 나타내어, 유기물을 분해하기 위한 광촉매 물질로 상업적으로 주목을 받는 기능성 소재이다[12,13]. 이산화티타늄은 초친수성 표면 구현이 가능하며[11] 실리콘 태양전지의 커버글래스 및 건물 유리창에 적용되어 자기세정(Self-Cleaning) 기능을 구현하고, 염료감응형 태양전지(Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC)에 적용되어 광전변환효율을 향상시킨다[14]. 또한 리튬이온전지의 충방전 과정 중 리튬이온의 출입에 따른 전극소재의 부피변화율이 4% 정도로 미미하기 때문에 높은 사이클 안정성을 갖는 리튬이온전지의 전극소재로도 활용이 가능하다[15].

본 연구에서는 저가의 CBD 공정을 이용하여 3차원 이산화티타늄 나노벽 유사구조를 합성하였고, 합성 조건에 따른 형상학적 특성과 열처리 조건에 따른 결정학적 특성을 분석하여 제시하였다.

2. 실험방법

CBD 방법에서는 금속(Metal)과 수용액을 이용하는 Metal Hydroxide 방법을 이용하여 기판에 수직인 나노벽 유사구조의 LaOF[7], ZnO[8-10], NiO[8], Co₃O₄[8], TiO₂[11] 소재를 합성할 수 있다. 특히 수열합성 공정(Hydrothermal Synthesis Process)으로 간단하게 처리하는 CBD 방법은 전구체가 자기 조립되는 버텀-업 속도와 분해되는 톱-다운 속도의 차이를 조절함으로써 기판 전체에 걸쳐 3차원 나노벽 유사구조를 대면적으로 간단하게 성장시킬 수 있다.

3차원 나노벽 유사구조의 수직 성장은 수용액에 Metal이 용해되는 양을 pH, 온도, 시간 등을 조절하여 원하는 나노벽 유사구조를 성장시킬 수 있는데, 본 연구에서는 Ti Metal과 Urea 수용액을 사용하였다. Ti Metal이 Urea 속의 암모늄 이온과 만나 용해되는 과정은 다음의 Eq. (1)처럼 나타낼 수 있다.



3차원 이산화티타늄 나노벽 유사 구조물의 성장에서 온도와 숙성시간의 효과를 조사하기 위하여, Fig. 1에 나타낸 것과 같이 CBD 공정을 사용하여 Ammonium Titanate 나노구조물을 합성하였다. 3차원 나노벽 유사 구조를 갖는 Ammonium Titanate의 성장은 Teflon-Lined Autoclave 안에서 이루어졌고, 원료물질은 Urea (JUNSEI, 순도 98.0%), Ti Sheet(ALDRICH,

순도 99.7%, 두께 0.25 mm)를 사용하였다. Teflon Beaker 안에 Urea 5 g을 증류수 40 ml에 용해시킨 후 10 mm × 10 mm 크기의 Ti Sheet를 담그고 오븐 안에서 일정한 온도(60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C)로 CBD 공정을 12시간 ~ 156시간까지 다양한 조건으로 진행하였다. Ammonium Titanate가 성장된 후 수열처리 된 Ammonium Titanate Sheet를 증류수에 세척한 후, 3 시간 동안 열처리를 수행하였다. 열처리 온도가 오븐에서 진행하였으며, 열처리 온도는 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C이었다. 열처리 과정을 통하여 Ammonium Titanate 나노구조물은 TiO₂ 나노구조물로 상이 변환된다.

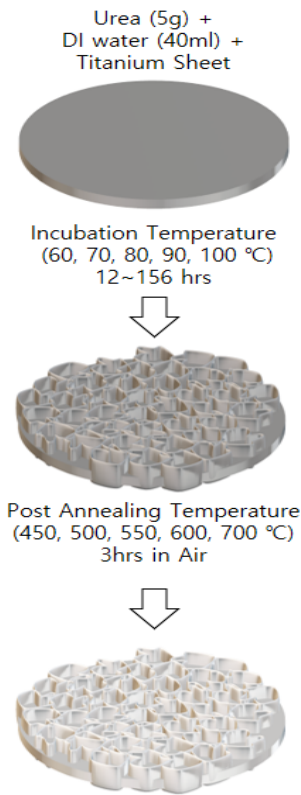


Fig. 1. Schematic diagram of the 3D TiO₂ nano-wall-like structure grown by chemical bath deposition process

CBD 공정으로 다양한 온도와 숙성시간으로 성장된 Ammonium Titanate 나노구조물의 표면형상과 열처리 후의 표면형상을 전계방출 주사전자현미경(FE-SEM, JEOL JSM- 6500F)으로 관찰하였고, 그 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 또한 열처리 전후의 나노구조물

의 결정학적 특성을 X선 회절실험(X-Ray Diffraction, XRD, ThermoFisher Scientific, K-Alpha+, Cu K-Alpha radiation)을 통하여 조사하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

다양한 CBD 공정 조건으로 수열합성 된 Ammonium Titanate 나노구조물의 표면형상을 관찰하기 위하여 FE-SEM 분석을 수행하였다. 96시간동안 CBD 공정을 수행한 시편을 수열합성 온도 각각에 대하여 시편을 수직방향으로 관찰한 Top-Side View(Fig. 2. a, c, e, g, i)와, 구조의 복잡성을 고려하여 기판에 대하여 45° 각도에서 관찰한 Tilted View(Fig. 2. b, d, f, h, j)를 Fig. 2에 나타내었다.

CBD 공정온도에 따라서 Ammonium Titanate 나노구조물의 표면형상이 전혀 다른 것을 확인할 수 있다. CBD 공정온도 60 °C에서는 수직방향의 Ammonium Titanate 나노구조물이 약간 성장하였고, 온도가 증가할수록 Ammonium Titanate 나노벽 유사구조가 점차적으로 더 크고 높게 성장되었다. 특히 90 °C에서 Ammonium Titanate 나노벽 유사구조가 균일하게 잘 성장된 것을 확인할 수 있다. 하지만 100 °C에서는 높은 온도로 인하여 Growth Rate 보다 Etching Rate이 높아서 3D 나노벽 유사구조를 유지하지 못하고 Particle만 남은 모습을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 E. Hosono[11] 등이 100 °C에서 96시간동안 CBD 공정을 수행하였을 때 Ammonium Titanate 나노벽이 잘 성장되었다고 보고한 결과와 다른 결과이며, 반복 실험을 진행하여도 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

CBD 공정에서 숙성시간에 따른 Ammonium Titanate Sheet의 성장양상도 온도 의존성과 유사하였다. 12시간 숙성하였을 경우, 나노벽의 성장은 미미하였으며, 숙성시간이 증가할수록 Ammonium Titanate 나노벽이 더 크고 높게 성장되었다. 하지만 숙성시간 96시간 이후에는 Ammonium Titanate 나노벽의 성장양상이 거의 변하지 않았다. 이와 같은 성장양상을 보았을 때, 3D Ammonium Titanate 나노벽 유사구조가 균일하게 성장되는 CBD 공정조건은 90 °C (Fig 2. g-h)에서 96시간 CBD 공정을 수행하는 것이 가장 적합한 것으로 판단된다.

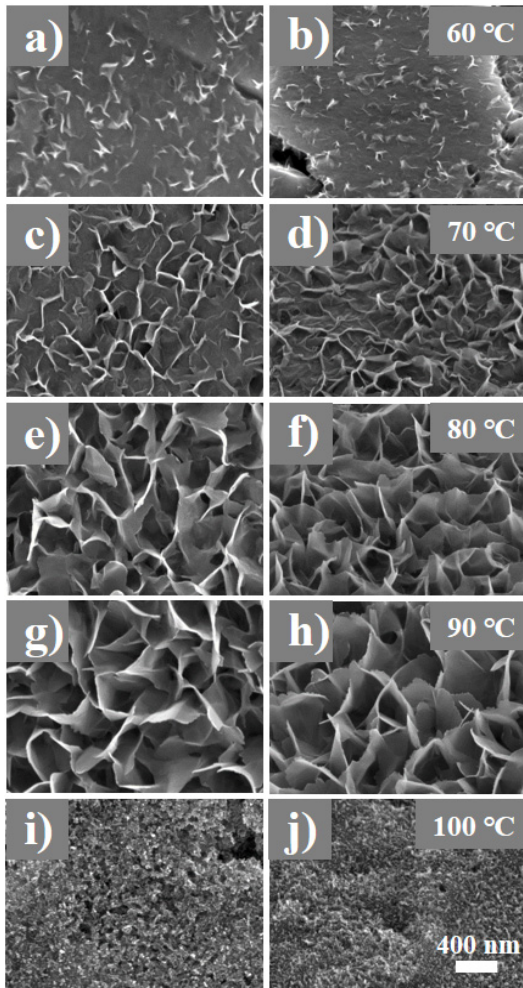


Fig. 2. FE-SEM images of the 3D ammonium titanate nano-wall-like structures grown by CBD process on Ti sheet under various incubation temperature of a-b) 60 °C, c-d) 70 °C, e-f) 80 °C, g-h) 90 °C, i-j) 100 °C for 96 hrs. The magnification of FE-SEM images is 100,000 times. (Left column : top-side-view images, right column : 45° tilted-view images)

CBD 공정으로 성장된 3D Ammonium Titanate 나노벽 유사구조를 다양한 기능성 소재로 활용할 수 있는 3D TiO₂ 나노벽 유사구조로 상변한 시키기 위하여 열처리 공정을 수행하였다. 90 °C 조건으로 성장된 Ammonium Titanate Sheet를 증류수에 세척한 후, 대기 중에서 3시간 동안 열처리 공정을 수행하였다. 이때 열처리 수행의 온도는 각각 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C이었다. 열처리 공정에 따른 3차원 나노벽 유사구조의 변형여부를 확인하기 위하여 FE-SEM 분석을 수행하여, Fig. 3에 나타내었다.

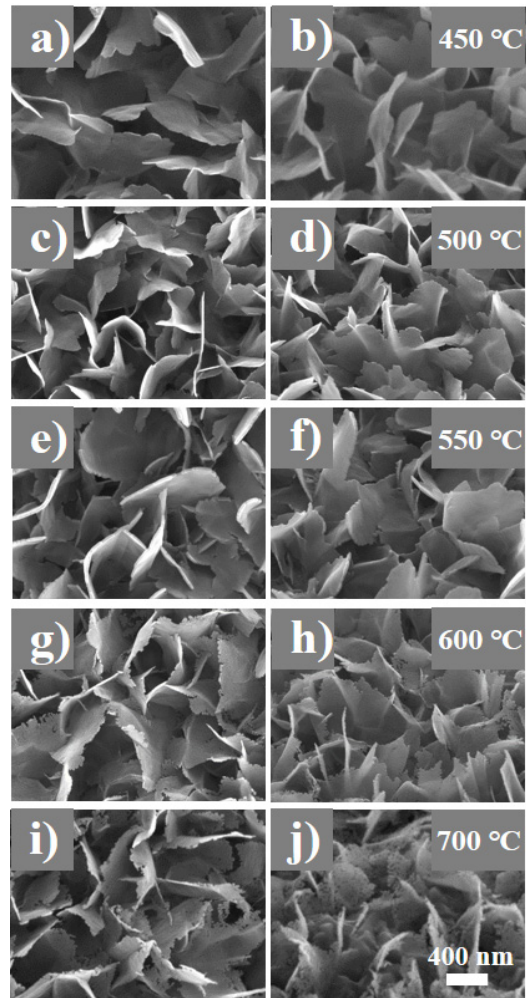


Fig. 3. FE-SEM images of the 3D titanate nano-wall-like structures grown by CBD process at 90 °C on Ti sheet for 96 hrs and various post annealing temperature of a-b) 450 °C, c-d) 500 °C, e-f) 550 °C, g-h) 600 °C, and i-j) 700 °C for 3 hrs. The magnification of FE-SEM images is 100,000 times. (Left column : top-side-view images, right column : 45° tilted-view images)

열처리 온도에 따라서 3차원 나노벽 유사구조의 형상이 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 550 °C 이하에서 열처리를 수행했을 경우에는 3차원 나노구조물의 표면형상에 변화가 거의 보이지 않았다. 하지만 열처리 온도 600 °C 에서는 나노벽의 가장자리가 미소하게 손상된 것을 관찰할 수 있다. 또한 열처리 온도 700 °C에서는 나노벽의 손상정도가 보다 광범위하게 진행되었다. 열처리 온도가 600 °C 이상으로 높아질수록 나노벽의 가장

자리 표면이 더 많이 기화(Evaporation)되어 손상되는 것으로 추측된다.

CBD 공정으로 90 °C에서 합성된 3D Ammonium Titanate 나노벽 유사구조와 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C에서 각각 열처리된 3차원 나노벽 유사구조의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 XRD 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 90 °C에서 CBD 공정으로 성장된 3차원 나노구조물의 경우, TiO_{0.176}(▼) (ICDD Card No. 01-082-7490) 피크만 관찰되었고, 34.94°, 37.87°, 39.91°, 52.47°, 62.67°, 69.77°, 75.61°, 76.92°에서 결정면 (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), (201)에 대응되는 피크를 확인할 수 있다.

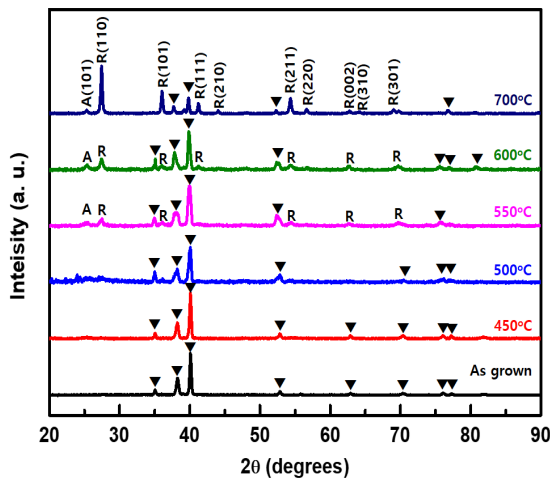


Fig. 4. XRD patterns of the 3D TiO₂ nano-wall-like structures grown by chemical bath deposition at 90 °C on Ti sheet for 96 hrs and various annealing temperature of 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C for 3 hrs. Symbols of A, ▼ and R denote Anatase TiO₂(A), TiO_{0.176}(▼), Rutile TiO₂(R), respectively

반면에 550 °C에서 열처리한 경우에는 Anatase TiO₂(A) (ICDD Card No. 00-064-0863), Rutile TiO₂(R) (ICDD Card No. 00-021-1276)의 피크가 약 하지만 관찰되었다. 600 °C에서 열처리한 경우에는 TiO₂-A(101)면과 TiO₂-R(110)면의 피크 세기가 높아 졌고, TiO₂-R 상의 피크가 다수 관찰되었다. 700 °C에서 열처리한 경우에는 TiO₂-A(101)면의 피크 Intensity가 상대적으로 감소하고, TiO₂-R(110)면의 Intensity가 두드러지게 높아졌으며, 전반적으로 TiO₂-R 상의 모든 피크의 Intensity가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 열처리 온도가 상대적으로 낮을 때에는 TiO₂-A(101)

면과 TiO₂-R(110)면이 생성되고 이후 열처리 온도가 높아짐에 따라 TiO₂-R(110)면의 비율이 증가하고, 점차 전체적으로 TiO₂-R 상의 피크 Intensity가 증가되는 양상을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 분야에 적용이 가능한 3차원 TiO₂ 나노벽 유사구조를 저가의 CBD 공정으로 합성하였고, CBD 공정의 최적조건과 열처리 조건에 대하여 분석하였다. 연구결과는 다음과 같다.

첫째, CBD 공정에서 3차원 나노벽 유사구조를 균일하게 성장시키는 온도는 90 °C이었다. CBD 공정온도가 낮을 경우에는 3차원 나노벽의 성장이 미미하였고, 100 °C 이상에서는 3차원 나노벽 유사구조가 성장되지 않았다.

둘째, 성장된 Ammonium Titanate 3차원 나노벽 유사구조를 공기 중에서 열처리하여 3차원 나노벽 유사구조의 TiO₂ 상으로 변환할 수 있었다. 열처리 온도가 550 °C인 경우, Anatase 상과 Rutile 상이 모두 관찰되었으며, 열처리 온도가 700 °C 경우에는 Rutile 상이 상대적으로 증가하는 것으로 판단된다.

셋째, 3차원 나노벽 유사구조는 열처리 온도에 따라 표면형상이 영향을 받았다. 열처리 온도 550 °C이하에서는 영향이 거의 없었지만, 600 °C에서는 나노벽의 가장자리가 미미하게 손상되었고, 700 °C에서 열처리한 경우에는 나노벽 가장자리의 손상 영역이 증가하였다.

이상에서 살펴본 것처럼 저가의 CBD 공정으로 합성된 3차원 TiO₂ 나노벽 유사구조는 높은 유효 표면적을 갖고 있기 때문에 높은 효율의 광촉매에 응용될 수 있을 것이다. 또한 리튬이온 이차전지의 충방전 과정 중에서 부피변화가 흑연을 사용하는 상용 리튬이온 이차전지보다 2.5배정도 작기 때문에 수명 특성이 매우 우수한 리튬이온전지의 음극 소재로 적용될 수 있을 것이다.

References

- [1] J. N. Tiwari, R. N. Tiwari, K. S. Kim "Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices", *Progress in Materials Science*, Vol. 57, pp. 724-803, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.08.003>
- [2] A. Pick, G. Witte, "Patterned growth of organic

- semiconductor: Selective nucleation of perylene on self-assembled monolayers”, *Langmuir*, Vol. 32, pp. 8019-8028, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b01833>
- [3] B. H. Lee, M. M. Sung, “Selective atomic layer deposition of metal oxide thin films on patterned self-assembled monolayers formed by microcontact printing”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 7, No. 11, pp. 3758-3764, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2007.18067>
- [4] M. H. Park, Y. J. Jang, H. M. Sung-Suh, M. M. Sung, “Selective atomic layer deposition of titanium oxide on patterned self-assembled monolayers formed by microcontact printing”, *Langmuir*, Vol. 20, pp. 2257-2260, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1021/la035760c>
- [5] W. Zhao, H. Y. Low, P. S. Suresh, “Cross-linked and chemically functionalized polymer supported by reactive reversal nanoimprint lithography”, *Langmuir*, Vol. 22, pp. 5520-5524, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1021/la052523w>
- [6] W-B Jung, S-Y. Cho, B. L. Suh, H-W. Yoo, H-J Jeon, J. Kim, H-T. Jung, “Polyelemental nanolithography via plasma ion bombardment: From fabrication to superior H₂ sensing application”, *Advanced Materials*, Vol. 31, Issue 6, p. 1805343, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201805343>
- [7] E. Hosono, S. Fujihara, T. Kimura, “Fabrication of nanoparticulate porous LaOF films through film growth and thermal decomposition of Ion-modified Lanthanum diacetate hydroxide”, *Langmuir*, Vol. 20, pp. 3769-3774, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1021/la036370t>
- [8] S. Fujihara, E. Hosono, T. Kimura, “Fabrication of porous metal oxide semiconductor films by a self-template method using layered hydroxide metal acetate”, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 31, pp. 165-168, 2004.
- [9] E. Hosono, S. Fujihara, I. Honma, H. Zhou, “The fabrication of an upright-standing zinc oxide nanosheet for use in dye-sensitized solar cells”, *Advanced Materials*, Vol. 17, pp. 2091-2094, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200500275>
- [10] E. Hosono, S. Fujihara, T. Kimura, H. Imai, “Growth of layered basic zinc acetate in methanolic solutions and its pyrolytic transformation into porous zinc oxide films”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 272, pp. 391-398, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.10.005>
- [11] E. Hosono, H. Matsuda, I. Honma, M. Ichihara, H. Zhou, “Synthesis of a perpendicular TiO₂ nanosheet film with the superhydrophilic property without UV irradiation”, *Langmuir*, Vol. 23, pp. 7447-7450, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1021/la701117a>
- [12] M. Ge, J. W. Li, L. Liu, Z. Zhou, “Template-free synthesis and photocatalytic application of rutile TiO₂ hierarchical nanostructures”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, pp. 6681-6687, 2011.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/ie1023113>
- [13] A. Das, M. Patra, R. R. Wary, P. Gupta, R. G. Nair, “Photocatalytic performance analysis of Degusa P25 under various laboratory conditions”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 377, p. 012101, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012101>
- [14] Y. H. Jang, X. Xin, M. Byun, Y. J. Jang, Z. Lin, D. H. Kim, “An unconventional route to high-efficiency dye-sensitized solar cells via embedding graphitic thin films into TiO₂ nanoparticle photoanode”, *Nano Letters*, Vol. 12, pp. 479-485, 2012.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/nl203901m>
- [15] M. Madian, A. Eychmuller, L. Giebeler, “Current advances in TiO₂-based nanostructure electrodes for high performance lithium ion batteries”, *Batteries*, Vol. 4, p.7, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries4010007>

김 미 리(Mee-Ree Kim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 목원대학교 신소재 화학공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 충남대학교 신소재 공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 지능정보융합학과 (박사 과정)

<관심분야>

에너지관련 소재, 기능성 소재, 그래핀, 가스센서

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 신소재화학공학과 교수

<관심분야>

에너지 저장소재, 가스센서, 에너지 하베스팅 소재