

태양광 전환/저장 융합 시스템 개발 연구 동향



박이슬
부경대학교
화학공학과

서론

전 세계적으로 기존 화석연료를 기반으로 하는 전기 생산을 신재생 에너지로 전환하고자 하는 노력이 활발하게 이루어지고 있다. EU의 경우 신재생 에너지의 사용 및 에너지 효율을 높임으로써 2050년까지 80~95%의 온실가스를 감축하는 것을 목표로 하고 있다.^[1] 신재생 에너지 중에서도 태양광 에너지는 풍부하고 친환경적인 에너지원으로 지구 표면에 매 시간 100,000TW의 에너지가 태양으로부터 전달되고 있다. 이러한 태양광 에너지를 활용하기 위해 태양광 집진기, 집중 태양열 발전시스템, 태양전지와 같은 발전 시스템이 활발히 개발되었으며, 생산 공정의 확대 및 제조 가격 하락으로 태양광 발전 시스템의 설치가 급격히 증가하고 있다.^[2] 하지만, 밤과 낮, 날씨에 따른 발전량의 변동으로 인한 낮은 발전 안정성이 가장 큰 단점으로 작용하고 있으며, 따라서 안정적인 전기 공급을 위해 배터리(battery), 슈퍼커패시터(supercapacitor)와 같은 효율적인 에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)이 결합된 시스템들이 개발되고 있다. 주로 태양광전환을 위한 태양전지와 에너지 저장을 위한 배터리 시스템을 직접 연결하여 태양광 발전된 전기를 전선으로 연결된 배터리에 저장하여 사용하게 된다. 이러한 시스템은 크기나 장소에 제약이 적은 대형 발전 시스템에 적합하나, 소형 발전 시스템에 적용하기에는 서로 다른 두 가지 시스템의 결합으로 인해 구성이 복잡해 질 뿐만 아니라 무게나 비용이 높은 단점이 있다. 또한, 두 시스템의 연결에서 오는 전압 손실(ohmic loss)도 생길 수 있어, 최근에는 하나의 시스템 내에서 태양광 전환과 저장이 함께 이루어질 수 있도록 하는 융합 시스템의 개발이 활발히 이루어지고 있다.^[3]

Redox flow 배터리와 결합하여 태양광 조사 하에서 에너지가 저장되는 시스템, 태양광 전환과 배터리 시스템에 필요한 전극을 공유한 시스템, 태양광 전환과 저장이 같은 전극에서 동시에 이루어지는 일체형 시스템의 개발이 보고되고 있다. 본고에서는 최근 활발하게 연구가 진행되고 있는 다양한 종류의 태양광 전환/저장 융합 시스템을 소개하고 관련 연구 동향에 대해 기술하고자 한다.

Solar Redox Flow 배터리 시스템

Solar redox flow battery(SRFB)는 redox flow 배터리와 photoelectrochemical cell(PEC)이 결합된 시스템으로 PEC 시스템을 이용해 태양에너지를 전환 시키고 생성된 전자, 정공에 의해 전해질이 환원, 산화되어 redox flow 배터리에 redox couple의 형태로 에너지가 저장된다. 그림 1에 나타난 것처럼, redox couple 물질을 포함한 전해질이 저장 탱크로부터 각각의 전극 셀로 공급되어 redox couple이 산화, 환원되고 이들이 다시 원상태로 복귀하면서 전기를 발생하게 된다. 원하는 용량, 전압에 따라 스택을 자유롭게 변경할 수 있기 때문에 시스템 구성에 제약이

적은 점이 장점이다. SRFB에서는 한쪽 전극 또는 양쪽 전극이 광전극으로 이루어지며, 광조사시에 광전극으로부터 생성된 전자와 정공이 산화-환원 반응을 일으키게 된다. 사용된 광전극의 종류와 전해질 내 redox couple의 종류에 따라 용량 및 전압이 달라지기 때문에 더 많은 태양광을 흡수할 수 있는 광전극과 안정적이고 높은 전압을 나타낼 수 있는 redox couple의 조합을 찾기 위한 노력들이 이루어지고 있다.

그림 2에서 보는 것과 같이 다양한 종류의 광전극과 전해질(redox couple)이 사용될 수 있으며, 사용되는 광전극과 전해질의 조합에 따라 SRFB의 전압이 달라지게 된다.^[4,5] 전해질의 redox couple은 광전극의 conduction band와 valence band의 에너지 레벨에 따라 환원, 산화의 가능 여부가 결정되기 때문에 기존의 PEC시스템과 redox flow 배터리에 적용되었던 광전극과 redox couple들의 적절한 조합을 찾는 연구가 주를 이루고 있다. 현재 약 10%의 태양광 전환 효율이 달성되었으나, 복합적인 요소들의 최적화를 통해 태양광 전환 효율을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.^[1]

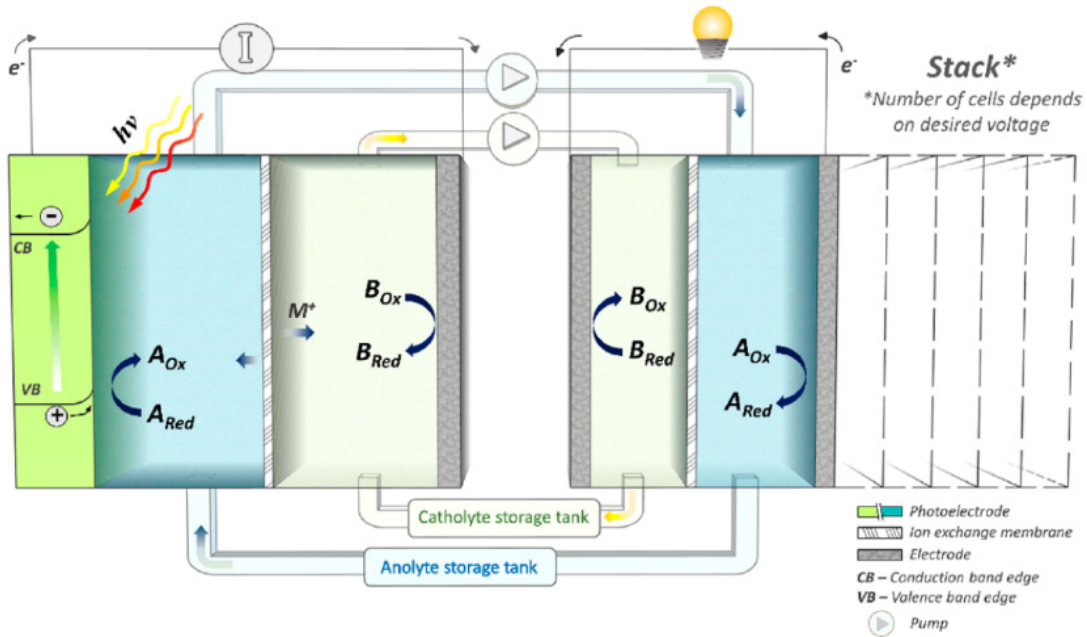


그림 1. Solar redox flow 배터리 시스템의 구조 및 작동 원리^[1]

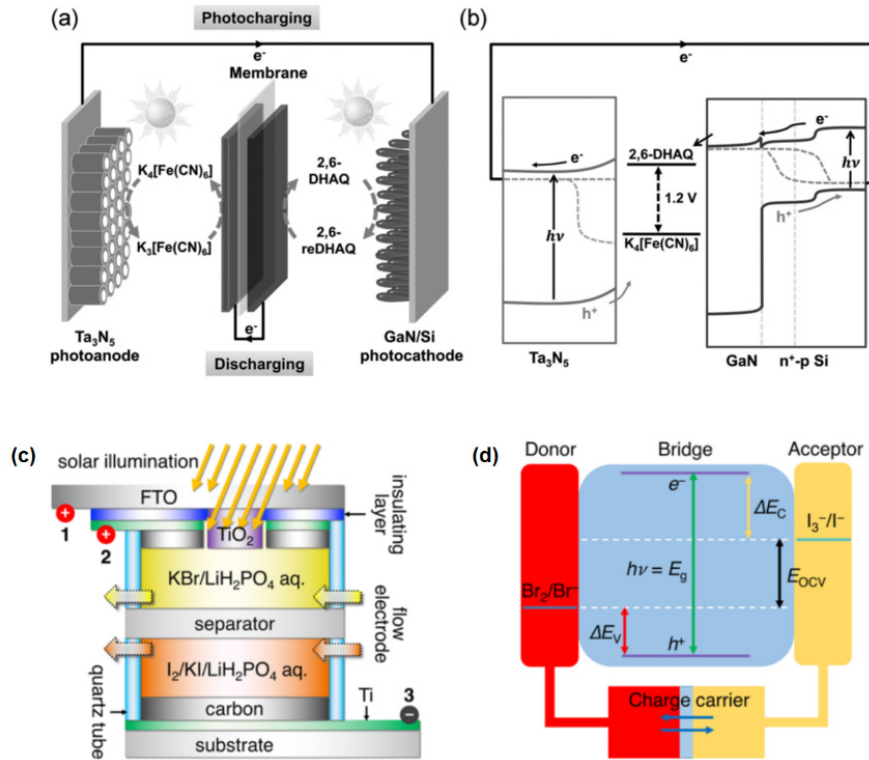


그림 2. Solar redox flow 배터리 시스템 구성의 예: (a,b) 양쪽 광전극 시스템($n\text{-Ta}_3\text{N}_5 \mid \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-3-} \parallel \text{DHAQ} \mid p\text{-Si/GaN}$),^[4] (c,d) TiO_2 광전극을 이용한 시스템($\text{TiO}_2 \mid \text{Br}_2/\text{Br}^- \parallel \text{I}_3^-/\text{I}^- \mid \text{C}$)^[5]

태양전자-배터리 전극 공유 시스템

이 시스템은 기존의 태양전지와 배터리가 외부 전선을 통해 연결시킬 경우 발생하는 에너지 손실 및 부피 증가를 막기 위해 태양전지와 배터리의 전극을 서로 공유하여 위의 문제를 해결하고자 하였다. 그림 3(a)에서의 태양전지와 배터리가 외부 전선으로 연결되어 구성된 태양광 전환/저장 시스템과는 달리, 위 시스템은 태양광을 전환하는 광전극, 광전극으로부터 전달된 전자를 저장하는 저장 전극, 그리고 방전시 연결하여 전자를 빼내는 counter 전극으로 구성되어 있으며, 태양광을 전환하는 시스템과 에너지를 저장하는 배터리의 전극을 서로 공유하며 하나의 시스템을 이루고 있다(그림 3(b)).

광전환 시스템으로는 광전기화학전지, 염료감응태양전지(DSSC), 유기태양전지(OPV) 등이 적용되었으며 에너지 저장 시스템으로는 Lithium ion 배터리(LIB), Li-O₂ 배터리, Supercapacitor 등이 적용되어 태양광 전환/저장 시

스템을 구성한다(그림 4). 그림 4(a), (b)의 경우 DSSC에서 발생된 전자를 LIB나 supercapacitor에 저장하는 시스템으로 counter 전극의 양면을 사용하여 두 종류의 시스템을 하나의 시스템으로 구성할 수 있도록 하였다. 태양광 전환 및 저장의 총 효율은 각각의 효율의 곱으로 구할 수 있으며, 그림 4(a), (b) 시스템의 경우 총 효율이 각각 0.82%, 2.1%를 나타내었다. DSSC와 Multi-walled carbon nanotube(MWCNT) supercapacitor가 결합된 시스템도 보고되었으며, 이 연구에서는 supercapacitor부분의 전극 물질을 개질하여 저장 효율을 높였으며, solid electrolyte를 사용하여 compact하고 유연한 시스템을 구현하였다.^[10] 태양광 전환 효율이 6.1%, 저장 효율이 84%로 총 전환/저장 효율이 5.12%로 나타났다. 시스템 구성에 따라 효율이 달라지게 되는데, 위의 연구 예와 같이 태양광 전환 효율이 낮아 전체적인 효율이 떨어지는 경우가 대부분이며, 이를 위해 효율적인 광전환 시스템의 적용이 필요하다.

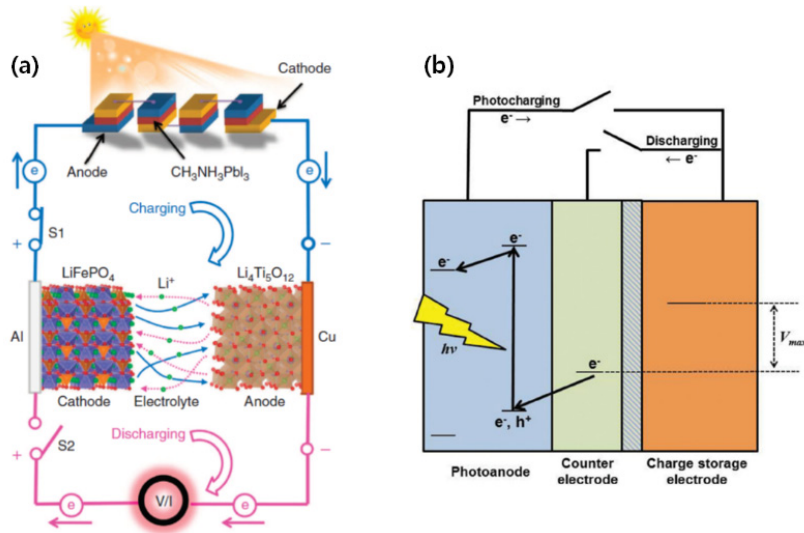


그림 3. (a) 태양전지와 배터리의 연결로 구성된 태양광 전환/저장 시스템,^[6] (b) 전극이 공유된 Solar rechargeable 배터리의 구성^[2]

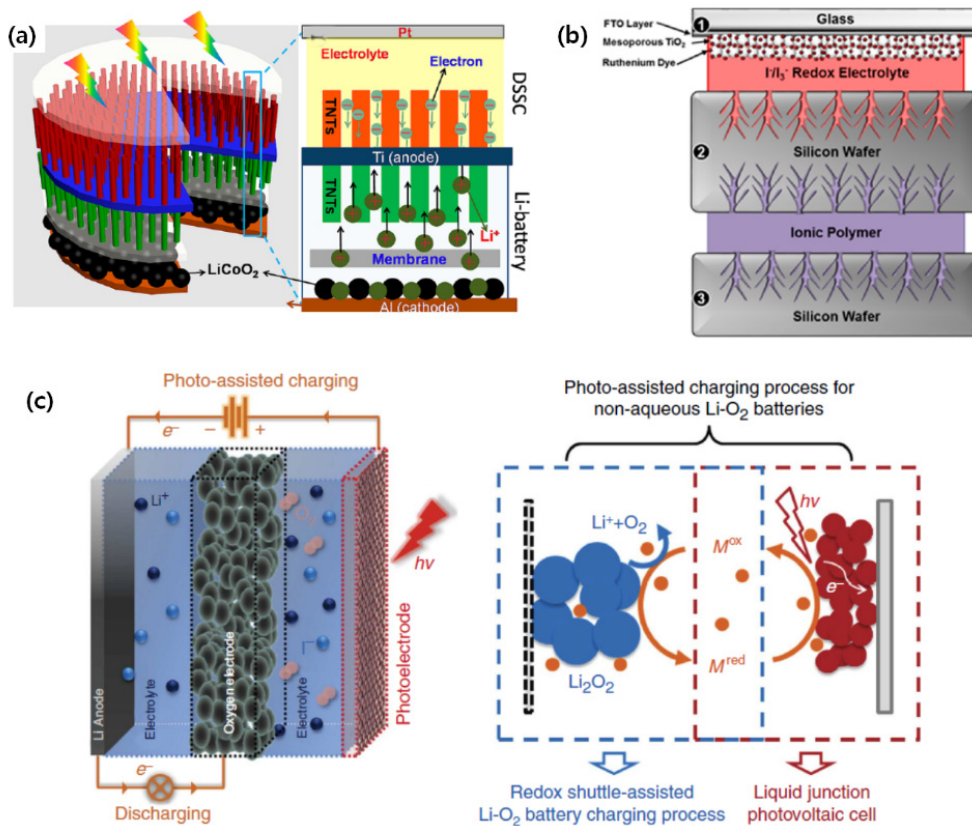


그림 4. 전극이 공유된 태양광 전환/저장 융합 시스템의 예: (a) DSSC/LiB,^[7] (b) DSSC/Supercapacitor,^[8] (c) DSSC/Li-O₂ battery^[9]

그림 4(c)는 DSSC와 Li-O₂ 배터리를 조합한 시스템으로 생성된 전자 뿐만 아니라 정공이 에너지 저장에 도움이 될 수 있었던 결과를 보여주고 있다. 광조사시 DSSC에서

생성된 전자는 Li이온 환원에 사용되고 정공(hole)은 Iodide redox couple을 산화시키고 산화된 Iodide는 Li-O₂ 배터리의 counter 전극에서의 Li₂O₂ 산화 반응에 이용되게 된

다. 기존 Li-O₂ 배터리에서 Li₂O₂의 산화 반응은 반응 속도가 느려 전체적인 배터리의 overpotential을 높여 에너지 효율을 낮출 뿐 아니라 반복 충방전에 있어서도 급격한 특성 감소를 보이게 하기 때문에 Li-O₂ 배터리의 중요한 문제로 작용하고 있었다. 그러나 DSSC 시스템과 결합시 빛 조사에 의해 생성된 정공이 Li₂O₂의 산화반응을 촉진시켜 Li-O₂ 배터리 작동에도 도움이 될 수 있게 된다. DSSC에서 생성된 전자에 의한 photovoltage와 Li₂O₂ 산화 반응 촉진에 의한 overpotential 감소로 인해 1V 이상의 충전 전압을 낮춘 효율적인 태양광 전환/저장 시스템을 구현할 수 있었다.^[9]

태양전자-배터리 일체형 시스템

앞서 소개한 태양광 전환/저장 융합 시스템은 두 시스템은 각각 유지하면서 한 전극을 공유하여 융합한 시스템이지만, 이번에 소개할 시스템은 광전환 시스템과 에너지 저장 시스템이 두 전극으로만 이루어진 일체형 시스템이다.

일체형 시스템은 같은 전극을 이용하여 빛 조사시에는 태양광 전환 및 충전이 이루어지고, 빛이 없는 조건에서는 방전이 이루어지게 된다. 이를 위해 배터리 전극에 광감응

소재를 직접 결합시키거나 배터리 전극 물질 자체가 빛 흡수가 가능한 소재를 사용하게 된다. 광감응 소재가 기존 배터리 전극 소재와 결합된 경우, 광조사시 광감응 소재로부터 생성된 전자, 정공이 기존 배터리 반응을 촉진시켜 저장 효율 및 전력 소모를 줄이는 역할을 하게 된다. 광감응 소재 및 광전환 반응은 배터리 시스템을 위한 보조적인 역할을 하게 되며, 이러한 시스템을 Photo(light)-assisted rechargeable battery라고도 부른다. 그림 5(a)에서 보인 연구 예는 Li-O₂ 배터리의 cathode에 C₃N₄ 광촉매를 담지시켜 빛 조사에 의해 형성된 정공이 Li₂O₂의 산화반응을 촉진시켜 overpotential을 대폭 줄인 것으로, 충전 전압을 1.9V로 크게 낮출 수 있었다. 앞서 소개된 DSSC/Li-O₂ battery와 유사한 효과를 보이고 있으나 이 연구에서는 cathode에 광촉매를 직접 담지시켜 2전극으로 광조사 효과를 볼 수 있었다.^[11] 비슷한 예로 Li-ion 배터리에서 LiFePO₄ cathode에 N719 염료를 담지시켜 광조사시 Li-ion 배터리의 전기화학적 성능을 향상시킨 연구가 보고 되었다.^[13] 충전시 LiFePO₄가 FePO₄로 산화되는데 이때 광이 조사되면 염료의 여기에 의해 형성된 정공이 위 산화반응을 촉진시켜 delithiation이 잘 일어나도록 한다.

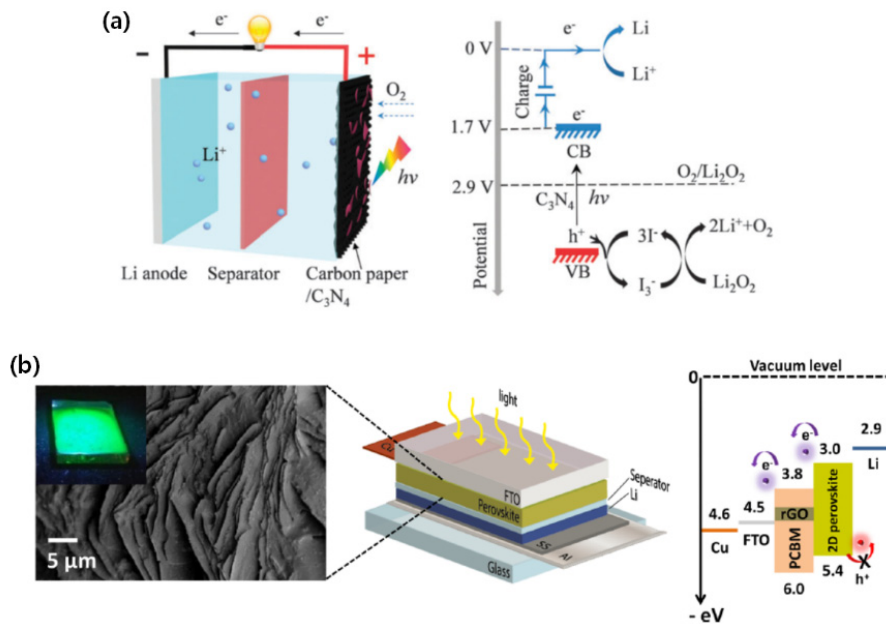


그림 5. 일체형 태양광 전환/저장 융합 시스템: (a) Photocatalyst/Li-O₂ battery,^[11] (b) Photo-rechargeable perovskite battery^[12]



뿐만 아니라 광조사에 의해 생성된 전자는 Li anode로 전달되어 SEI 형성에 사용되게 된다. 원활한 delithiation으로 인해 더 많은 FePO₄가 형성될 수 있기 때문에 빛이 조사되지 않았을 때에 비해 Li-ion 저장 용량이 증가함을 보였다.^[13]

그림 5(b)에 나타낸 그림은 광전환 전극과 저장 전극이 동일한 일체형 태양광 전환/저장 융합 시스템을 보여주고 있다. Organo-Halide perovskite 전극을 광전환/저장 전극으로 사용함으로써 완전한 일체형 시스템을 구현하였다. 사용된 perovskite 전극은 (C₆H₉C₂H₄NH₃)₂PbI₄ (CHPI) 물질로서 태양광을 흡수할 뿐 아니라 Li-ion 저장능력을 가지고 있어 태양광 전환/저장이 가능하다. 위 연구에서의 Li-ion 충전 용량은 약 100mAh/g으로 기존 태양전지와 배터리의 물리적 조합에 의한 융합시스템의 성능에 상응하는 특성을 나타냄으로써 더욱 compact한 구조의 융합 시스템의 구현이 가능함을 보였다.

결론

태양광 전환/저장 융합시스템은 좀 더 compact한 구조로 태양광 전환과 저장이 가능한 시스템을 만드는데 그 목적을 두고 있으며, 최근 다양한 형태의 융합 시스템이 활발하게 연구 되고 있다. Redox flow 배터리에 광전극을 도입한 solar redox flow 배터리 시스템은 기존 redox flow 배터리 시스템을 유지하면서 광전극과 이에 적절한 redox couple을 접목시키기 때문에 기술 발전이 빠르게 이루어지고 있으며 다른 융합시스템과 비교하여 가장 상용화에 가까운 기술이라고 할 수 있겠다. 하지만, redox flow 배터리는 부피가 크기 때문에 compact한 구조의 태양광 전환/저장 융합시스템을 위해서는 태양전지-배터리 전극 공유 시스템이나 일체형 시스템이 적절하다. 하지만, 낮은 태양광 전환-저장 효율, 광조사에 의한 부반응 문제,

태양광이 투과 가능한 셀의 구성 등 보완할 부분들이 많아 아직은 초기 연구 단계에 있으며, 위의 문제들이 개선하기 위한 다양한 연구들이 요구된다.

참고문헌

- [1] K. Wedege, D. Bae, W. A. Smith, A. Mendes, A. Bentien, *J. Phys. Chem. C*, **2018**, 122, 25729.
- [2] D. Schmidt, M. D. Hager, U. S. Schubert, *Adv. Energy Mater.*, **2016**, 6, 1500369.
- [3] S. Ahmad, C. George, D. J. Beesley, J. J. Baumberg, M. D. Volder, *Nano Lett.*, **2018**, 18, 1856.
- [4] S. Zhang, C. Chen, Y. Zhou, Y. Qian, J. Ye, S. Xiong, Y. Zhao, X. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, 10, 23048.
- [5] Q. Cheng, W. Fan, Y. He, P. Ma, S. Vanka, S. Fan, Z. Mi, D. Wang, *Adv. Mater.*, **2017**, 29, 1700312.
- [6] J. Xu, Y. Chen, L. Dai, *Nat. Commun.* **2015**, 6, 8103.
- [7] W. Guo, X. Xue, S. Wang, C. Lin, Z. L. Wang, *Nano Lett.*, **2012**, 12, 2520.
- [8] A. P. Cohn, W. R. Erwin, K. Share, L. Oakes, A. S. Westover, R. E. Carter, R. Bardhan, C. L. Pint, *Nano Lett.*, **2015**, 15, 2727.
- [9] M. Yu, X. Ren, L. Ma, Y. Wu, *Nat. Commun.* **2014**, 5, 5111.
- [10] Z. Yang, L. Li, Y. Luo, R. He, L. Qiu, H. Lin, H. Peng, *J. Mater. Chem. A*, **2013**, 1, 954.
- [11] Y. Liu, N. Li, S. Wu, K. Liao, K. Zhu, J. Yi, H. Zhou, *Energy Environ. Sci.*, **2015**, 8, 2664.
- [12] S. Ahmad, C. George, D. J. Beesley, J. J. Baumberg, M. D. Volder, *Nano Lett.*, **2018**, 18, 1856.
- [13] A. Paoletta, C. Faure, G. Berton, S. Marras, A. Guerfi, A. Darwiche, P. Hovington, B. Commarieu, Z. Wang, M. Prato, M. Colombo, S. Monaco, W. Zhu, Z. Feng, A. Vijn, C. George, G. P. Demopoulos, M. Armand, K. Zaghbi, *Nat. Commun.*, **2017**, 8, 14643.