

# 진공 열 증착 기반의 정공수송층 적용을 통한 페로브스카이트 태양전지

김혜승 · 송명훈\*

신소재공학과, 울산과학기술원, 울산광역시, 44919

## Perovskite Solar Cells through Application of Hole Transporting Layers based on Vacuum Thermal Evaporation

Hye Seung Kim · Myoung Hoon Song\*

Department of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Sciences and Technology (UNIST), Ulsan, 44919, Korea

Received February 9, 2022; Revised March 14, 2022; Accepted March 15, 2022

**ABSTRACT:** In this study, we investigate organic-inorganic halide perovskite solar cells with a vacuum thermal evaporated hole transporting layer (NPB/MoO<sub>3-x</sub>). By replacing solution process based Spiro-MeOTAD with vacuum thermal evaporation based NPB/MoO<sub>3-x</sub>, a thin hole transporting layer was implemented. In addition, parasitic absorption that may occur during the doping process was eliminated by excluding solution process doping. In a solar cell with a thin vacuum thermal evaporated hole transporting layer, the short-circuit current density (Jsc) increased to 23.93 mA/cm<sup>2</sup>, resulting in the highest power conversion efficiency (PCE) at 18.76%. Considering these results, it is essential to control the thickness of hole transporting layer located at the top in solar cell configuration.

**Key words:** Perovskite, Solar cell, N-I-P structure, Hole transporting layer, Vacuum thermal evaporation

### Subscript

PeSC : perovskite solar cell

HTM : hole transporting material

CTL : charge transporting layer

HTL : hole transporting layer

Jsc : short circuit current density

Voc : open circuit voltage

FF : fill factor

PCE : power conversion efficiency

### 1. 서론

유무기 할라이드 페로브스카이트 물질은 낮은 엑시톤 결합 에너지<sup>1)</sup>, 높은 흡광 계수<sup>2)</sup>, 긴 캐리어 확산 길이<sup>3)</sup> 및 높은 캐리어 이동성<sup>4)</sup>과 같은 광전자 특성으로 인해 지난 10년 동안 태양광 연구에서 큰 관심을 받아왔다. 최근 페로브스카이트 단일 접합형 태양전지는 25.5% 이상의 높은 전력변환효율(PCE)을 달성했다<sup>5)</sup>.

태양전지를 구성하고 있는 구성층 중, 전하 수송층(CTL)은 태양전지 내에서 핵심적인 역할을 한다<sup>6)</sup>. 기존의 n-i-p 구조에서 태양전지 상단의 전극과 직접적으로 접촉하는 정공수송층(HTL)은 정공 추출과 외부로부터 페로브스카이트를 보호하는 물리적 장벽 역할을 한다.

2,2',7,7'-Tetrakis[N,N-di(4-methoxyphenyl)amino]-9,9'-spirobifluorene (Spiro-MeOTAD)는 상대적으로 높은 유리 전이 온도(T<sub>g</sub>≈120°C), 형태학적 안정성, 용액 처리의 용이성, 페로브스카이트와 잘 일치하는 적절한 에너지 레벨과 같은 이유로 현재까지 세계 최고 전력 변환 효율을 달성한 대부분의 페로브스카이트 태양전지(PeSC)에서 HTL로 사용되었다<sup>7,8)</sup>. 하지만, Spiro-MeOTAD 자체의 낮은 정공 이동도, 전도도로 인하여 도핑을 통해 최적의 정공 이동도와 전도도를 얻어야한다<sup>9)</sup>. 따라서 Lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (Li-TFSI), Cobalt complex, 4-tert-butylpyridine 등 도핑 첨가제들이 정공 이동도 및 전도도 향상에 사용되어왔다<sup>10-12)</sup>. 하지만, 이 때 사용되는 도핑 첨가제들은 흡습성<sup>13)</sup>을 가지고 도핑 첨가제가 첨가되었을 때, Spiro-MeOTAD의 본연의 열 안정성을 잃게되는 문제점이 있다<sup>14)</sup>. 또한, 일반적인 외부 환경으로부터 페로브스카이트 층에 결함을 유도하거나 소자 안정성 및 수명에 심각한 영향을 미

\*Corresponding author: mhsong@unist.ac.kr

칠 수 있고 용액 공정으로만 처리할 수 있기 때문에, 대면적 소자 또는 산업화에 적절하지 않다<sup>15-17</sup>.

이와 같은 이유로, 최근 도핑이 필요하지 않은 HTL 연구가 많이 진행되어오고 있다<sup>18</sup>. 그 중, 도핑으로 인한 문제점을 해결하고 대면적화, 텐덤화 및 산업화에 적절하고 저비용이며 쉬운 공정 방법인 진공 열 증착 공정을 이용한 HTL 연구가 대두되고 있다<sup>19,20</sup>.

본 연구에서는 용액 공정 기반의 Spiro-MeOTAD를 진공 열 증착 기반의 N,N-bis(naphthalen-1-yl)-N,N-bis(phenyl)benzidine (NPB)로 대체하여 유무기 할라이드 페로브스카이트 태양전지를 구현하였고, NPB가 Spiro-MeOTAD 대비하여 얇은 두께를 가짐에도 불구하고 향상된 태양전지 효율을 달성함을 확인하였다. 얇은 NPB 두께와 용액 도핑의 부재로 Spiro-MeOTAD의 기생 흡수 특성을 배제함을 자외선-가시광선 분광계를 통해 확인할 수 있었다. 본 연구에서 다뤄진 진공 열 증착 기반의 HTL에 관한 연구가 활발히 진행된다면, 향후 대면적 및 패턴화된 실리콘 태양전지와 함께 고효율 텐덤 태양전지 구현에 기여할 수 있을 것이라 예상된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 태양 전지의 제작

페로브스카이트 태양전지는 indium doped tin oxide (ITO) 기판 위에 제조되었다. 소자 제작 전, ITO 기판을 아세트, 이소프로필알코올, 증류수 순으로 각각 15분씩 초음파를 이용하여 세척하였다. 세척한 ITO 기판을 30분간 자외선/오존 처리하였다. 3 wt%로 희석한 SnO<sub>2</sub> 나노입자 분산용액을 3000 rpm으로 30초간 스핀 코팅한 후, 150°C 30분 동안 열처리하였다. C<sub>60</sub>-SAM은 클로로벤젠에 3 mg/ml 농도로 용해 후, 0.2 μm 소수성 PTFE 필터로 필터링 후, SnO<sub>2</sub> 필름 위에 3000 rpm 30초간 스핀 코팅 후, 120°C로 10분 동안 열처리 하였다. 1.4M의 페로브스카이트 전구체 용액은 FAPbI<sub>3</sub>, MAPbBr<sub>3</sub>, CsI에 대해 83:17:4.66 용적비로 혼합하여 0.45 μm PVDF 필터를 사용하여 여과하였다. 여과된 페로브스카이트 용액을 C<sub>60</sub>-SAM/SnO<sub>2</sub>/ITO 기판에 10초간 500 rpm, 20초간 5000 rpm으로 스핀 코팅하였다. 스핀 코팅 시 2차 스핀 공정 후 15초 이내에 450 μl의 에틸아세테이트를 적하하여 100°C에서 1시간 열처리하였다. 정공 수송층으로 Spiro-MeOTAD는 72.3 mg/ml 농도로 클로로벤젠에 용해하였고, 1 ml의 용액에 Li-TFSI (520 mg/ml 농도로 아세트나이트릴에 용해), FK209 (600 mg/ml 농도로 아세트나이트릴에 용해), 4-tert-butylpyridine을 각각 17.6 μl, 16.5 μl, 28.5 μl의 용적비로 첨가한 후, 4000 rpm 30초간 페로브스카이트 층 위에 스핀 코팅 하였다. NPB는 0.2 Å/s, MoO<sub>3-x</sub>는 0.3 Å/s로 각각 10 nm, 20 nm 진공 열증착하였다. 마지막으로, 금 전극을 80 nm 진공 열증착함으로써 n-i-p 구조의 유무기 할라이드 페로브스카이트 태양전지를 제작하였다.

### 2.2 특성 분석

정공 수송층의 두께에 따른 투과도를 자외선-가시광선 분광계 (Cary 5000, Agilent Technologies)을 이용하여 측정하였다. 제작된 소자의 단면은 field-emission scanning electron microscopy (S-4800 Cold FE-SEM, Hitachi high-Technologies)를 이용하여 관찰하였다. 전류밀도-전압 곡선은 Ivium-n-Stat source meter와 xenon 램프가 장착된 PEC-L01 solar simulator로 측정하였다. 소자에 가하는 빛의 강도는 1.5 G (100 mW/cm<sup>2</sup>)로 PEC-SI01 KG5-filtered Silicon reference cell로 보정하였다. UPS 스펙트럼은 He (21.2 eV) 자외선 선원이 있는 UPS 시스템 (AXIS Nova, Kratos Analytical)으로 측정되었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

태양전지의 제작에 있어, 고려해야 하는 요소 중 하나는 광학적 손실을 줄이는 것이다. 광학적 손실을 고려하여, n-i-p 구조에서 최상단에 위치한 HTL의 두께를 줄이는 것이 하나의 방법이 될 수 있다. 하지만, 흔히 사용되는 용액 공정 기반의 Spiro-MeOTAD는 두께가 100 nm 또는 그 이하가 되었을 때, 페로브스카이트 표면을 완전히 덮어주지 못하고 핀 홀과 같은 형태학적 결함이 생겨 Voc가 감소한다는 보고가 있다<sup>21</sup>. 따라서, 본 연구에서는 HTL의 두께를 줄여 광학적 손실을 최소화하면서 태양전지 특성 저하가 일어나지 않도록 진공 열 증착 기반의 HTL인 NPB를 도입하였다. 유기 단분자인 NPB의 전도도 향상을 위하여 용액 공정 기반의 도핑 첨가제가 아닌 무기 산화물인 MoO<sub>3</sub>를 진공 열 증착하여 전도도 향상을 유도하였다.

Fig. 1은 NPB의 전도도를 향상시키는 방법을 도식화한 것이다. Fig. 1(a)와 같이 낮은 이온화 에너지를 가진 HTL로부터 바닥상태의 전자가 금속 산화물인 MoO<sub>3-x</sub>로 이동하고 따라서 얇은 HTL 전체에 걸쳐 정공 캐리어 밀도를 향상시킬 수 있다. 또한, Fig. 1(b)는 HTL을 구성하는 NPB와 MoO<sub>3-x</sub>의 에너지 레벨을 고려하여 에너지 밴드 형성을 하였을 때, Fig. 1(a)와 같은 원리가 이루어질 수 있음을 확인하였다.

NPB 기반의 태양전지 제작을 위하여 NPB 두께 최적화를 하였다. Fig. 2는 MoO<sub>3-x</sub> 두께를 20 nm로 고정하고 NPB 두께를 10, 20, 30 nm에 따른 태양전지의 전류밀도-전압 곡선 그래프이다. NPB가 10 nm의 두께를 가졌을 시에 직렬 저항이 가장 낮고 Jsc가 증가함을 알 수 있다. 이는, NPB 상단에 위치한 MoO<sub>3-x</sub>가 NPB와의 페르미 레벨 피닝을 통하여 NPB를 p-도핑시킬 수 있고<sup>22</sup> MoO<sub>3-x</sub>가 20 nm 일 때, NPB 10 nm의 두께가 가장 최적의 전하 추출을 할 수 있다는 걸 알 수 있다.

Fig. 3은 Spiro-MeOTAD와 NPB 박막의 광투과도를 보여주며, 얇은 두께의 NPB가 단파장과 장파장의 영역에서 투과도가 크게 증가함을 알 수 있다. 이는, 용액 공정을 이용한 Spiro-MeOTAD의 도핑 과정에서 발생하는 기생 흡수를 배제

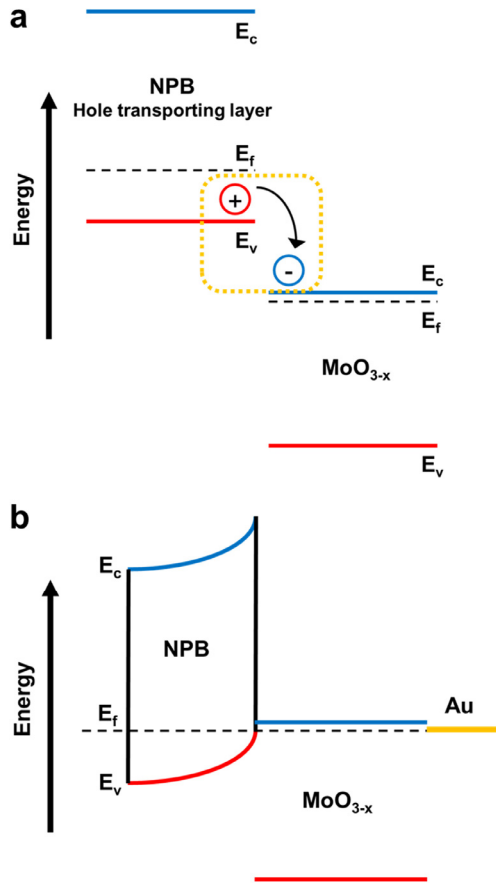


Fig. 1. Schematics of (a) interface doping and (b) energy alignment and band bending at the interface of NPB/MoO<sub>3-x</sub> HTL, E<sub>c</sub>(E<sub>v</sub>) indicates the edge of the conduction (valence) band while E<sub>f</sub> denote the Fermi level

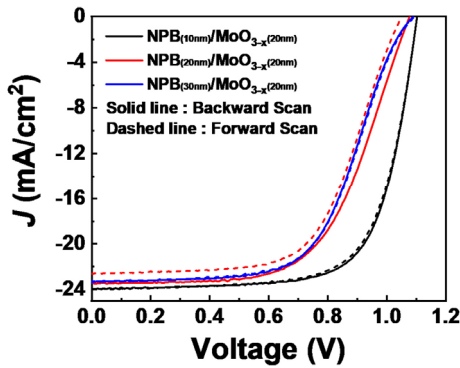


Fig. 2. J-V curves of NPB/MoO<sub>3-x</sub> based perovskite solar cells depending on NPB thickness under AM 1.5G illumination

한 결과임을 알 수 있다<sup>23)</sup>.

Fig. 4는 각 HTL을 이용한 페로브스카이트 태양전지의 단면 SEM 이미지와 페로브스카이트 표면 위에서의 각 HTL의 모폴로지 특성을 보여주는 AFM 이미지이다. Spiro-MeOTAD는 용액 공정으로 페로브스카이트 상부에 코팅 되기 때문에, 페로브스카이트의 그레인이 보이지 않을 정도로 두껍게 증착됨을 알 수 있다. 이와 다르게, NPB의 경우에는 진공 열 증착을 통해 정

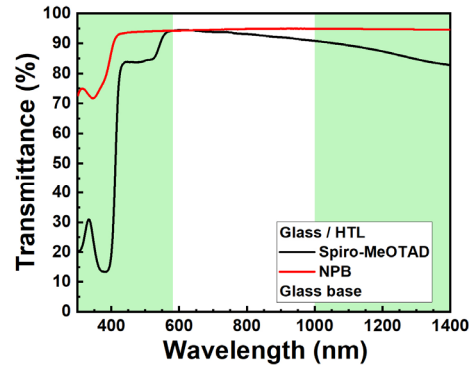


Fig. 3. Transmittance spectra of Spiro-MeOTAD, NPB films deposited on glass

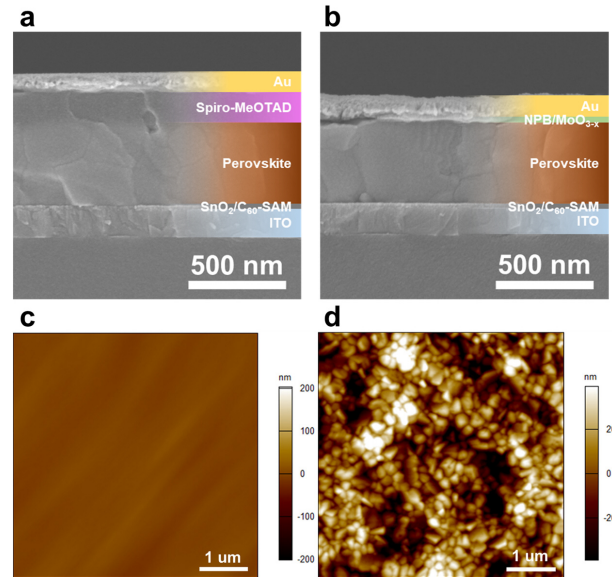


Fig. 4. Cross-section SEM images of (a) Spiro-MeOTAD and (b) NPB/MoO<sub>3-x</sub> based PeSCs and AFM images of (a) Spiro-MeOTAD and (b) NPB on perovskite surface, respectively

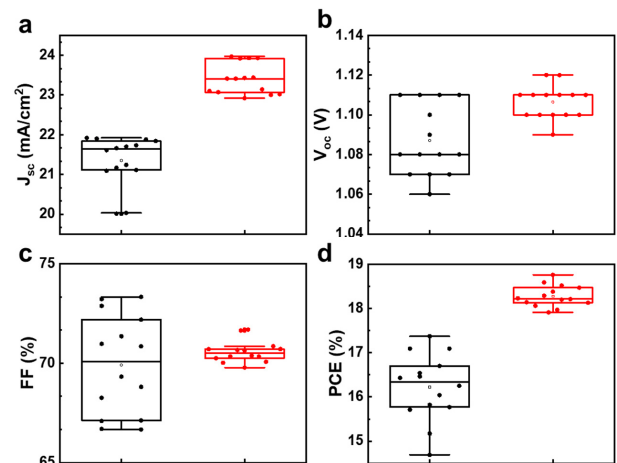
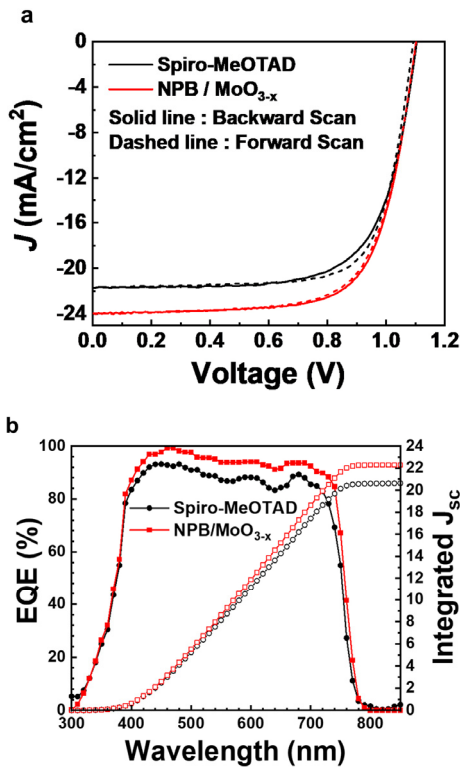


Fig. 5. Statistical analysis of (a) J<sub>sc</sub>, (b) V<sub>oc</sub>, (c) FF, and (d) PCE for solution processed Spiro-MeOTAD and vacuum thermal evaporated NPB/MoO<sub>3-x</sub> based devices (black : Spiro-MeOTAD, red : NPB/MoO<sub>3-x</sub>)



**Fig. 6.** (a) J-V curves of solution processed Spiro-MeOTAD and vacuum thermal evaporated NPB/MoO<sub>3-x</sub> based devices under AM 1.5G illumination and (b) EQE spectras of Spiro-MeOTAD and vacuum thermal evaporated NPB/MoO<sub>3-x</sub> based PeSCs

밀하게 두께 조절을 할 수 있고 10 nm의 얇은 두께로 증착이 되어 있으므로, 페로브스카이트 그레인 형태가 그대로 유지되면서 단차를 따라서 등각적으로 코팅되었음을 알 수 있다.

Fig. 5를 보면, Spiro-MeOTAD 기반의 PeSC보다 NPB 기반의 PeSC의 J<sub>sc</sub>가 월등히 높음을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 광투과도 그래프에서 예상했던 것과 같은 결과이다. 또한, 소자가 구동할 시 얻을 수 있는 태양전지 특성 파라미터들의 편차가 적기 때문에 진공 열 증착을 이용한 소자 제작 재현성이 향상되었음을 또한 알 수 있다.

Fig. 6은 용액 공정 Spiro-MeOTAD 기반의 PeSC와 최적화된 진공 열 증착 NPB/MoO<sub>3-x</sub> 기반의 PeSC의 최고 효율을 나타낸 전류밀도-전압 곡선 그래프와 외부 양자 효율 스펙트럼이다. 각 소자들의 태양전지 특성 값들은 Table 1에 정리되었다. NPB/MoO<sub>3-x</sub> 기반의 태양전지는 Spiro-MeOTAD 기반의 태양전지와 유사한 1.11 V의 Voc 값을 보였지만, 앞서 설명한 얇은 두께로 인한 광투과 향상을 통해 J<sub>sc</sub>가 23.93 mA/cm<sup>2</sup>로 증가했고 이를 통해 NPB/MoO<sub>3-x</sub> 기반의 태양전지 최고 전력변환효율은 18.76%를 달성할 수 있었다. 따라서, 높은 효율의 n-i-p 구조 유무기 페로브스카이트 태양전지를 제작하기 위해서는 최상단에 위치한 HTL의 두께 제어가 필수적임을 알 수 있다. 추후, 용액 도핑 첨가제를 사용하지 않은 NPB/MoO<sub>3-x</sub> 기반의 태양전지

**Table 1.** Summary of champion photovoltaic parameters of PeSCs depending on HTL (BS:Backward Scan, FS: Forward Scan, Scan rate: 100 mV/sec)

HTL	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF (%)	PCE (%)
Spiro-MeOTAD (BS)	21.70 (21.36 ±0.66)	1.11 (1.09 ±0.02)	69.32 (69.53 ±2.70)	16.70 (16.17 ±0.86)
Spiro-MeOTAD (FS)	21.73 (21.34 ±0.67)	1.09 (1.09 ±0.02)	73.33 (70.30 ±2.45)	17.37 (16.28 ±0.70)
NPB/MoO <sub>3-x</sub> (BS)	23.93 (23.42 ±0.38)	1.11 (1.11 ±0.01)	70.64 (70.58 ±0.54)	18.76 (18.35 ±0.25)
NPB/MoO <sub>3-x</sub> (FS)	23.93 (23.39 ±0.42)	1.10 (1.10 ±0.01)	70.37 (70.57 ±0.61)	18.52 (18.20 ±0.23)

의 열 안정성 및 수분 안정성 변화에 관한 연구가 진행될 예정이며, 이를 기반으로 n-i-p 기반의 텐덤 태양전지 제작 연구가 심도 있게 진행될 예정이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 n-i-p 구조의 유무기 할라이드 페로브스카이트 태양전지를 구현하였다. 또한 가장 널리 사용되는 기존의 용액 공정 기반의 Spiro-MeOTAD 대신 진공 열 증착 기반의 NPB를 정공 수송층으로 대체하여 제작하였고, 페로브스카이트와의 에너지 레벨 맞춤 및 NPB의 전도도 향상을 위하여 MoO<sub>3-x</sub> 또한 진공 열 증착하여 소자를 제작하였다. Spiro-MeOTAD보다 얇은 두께를 가지는 NPB는 기생 흡수가 사라지는 것을 확인하였고, 이로 인해 J<sub>sc</sub>가 향상되어 18.76%라는 전력 변환 효율을 달성함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들을 종합하였을 때, 추후 페로브스카이트 태양전지의 대면적화, 상업화 및 텐덤화를 위하여 진공 열 증착 기반의 정공수송층의 개발이 중요한 기초가 될 것이라 예상된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 기후변화대응기술개발사업(NRF-2019M1A2A2072416)과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20213091010010, 슈퍼 태양전지 - 실리콘 이론허게 돌파형 (>35%) 이중접합 태양전지 개발)을 받아 수행된 연구임.

## References

1. V. D'Innocenzo, G. Grancini, M.J.P. Alcocer, A.R.S. Kandada, S.D. Stranks, M.M. Lee, G. Lanzani, H.J. Snaith, A. Petrozza,

- "Excitons versus free charges in organo-lead tri-halide perovskites," *Nature Communications*, 5(1), 3589 (2014).
- S. Sun, T. Salim, N. Mathews, M. Duchamp, C. Boothroyd, G. Xing, T.C. Sum, Y.M. Lam, "The origin of high efficiency in low-temperature solution-processable bilayer organometal halide hybrid solar cells," *Energy & Environmental Science*, 7(1), 399-407 (2014).
  - S.D. Stranks, G.E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M.J.P. Alcocer, T. Leijtens, L.M. Herz, A. Petrozza, H.J. Snaith, "Electron-Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber," *Science*, 342 (6156), 341 (2013).
  - C. Wehrenfennig, G.E. Eperon, M.B. Johnston, H.J. Snaith, L.M. Herz, "High Charge Carrier Mobilities and Lifetimes in Organolead Trihalide Perovskites," *Advanced Materials*, 26(10), 1584-1589 (2014).
  - NREL, "Best Research-Cell Efficiency Chart, 2021," <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. (Accessed 26 July 2021).
  - S. Shao, M.A. Loi, "The Role of the Interfaces in Perovskite Solar Cells," *Advanced Materials Interfaces*, 7(1), 1901469 (2020).
  - J. Jeong, M. Kim, J. Seo, H. Lu, P. Ahlawat, A. Mishra, Y. Yang, M.A. Hope, F.T. Eickemeyer, M. Kim, Y.J. Yoon, I.W. Choi, B.P. Darwich, S.J. Choi, Y. Jo, J.H. Lee, B. Walker, S.M. Zakeeruddin, L. Emsley, U. Rothlisberger, A. Hagfeldt, D.S. Kim, M. Grätzel, J.Y. Kim, "Pseudo-halide anion engineering for  $\alpha$ -FAPbI<sub>3</sub> perovskite solar cells," *Nature*, 592(7854), 381-385 (2021).
  - Z. Hawash, L.K. Ono, Y. Qi, "Recent Advances in Spiro-MeOTAD Hole Transport Material and Its Applications in Organic-Inorganic Halide Perovskite Solar Cells," *Advanced Materials Interfaces*, 5(1), 1700623 (2018).
  - T.P.I. Saragi, T. Spehr, A. Siebert, T. Fuhrmann-Lieker, J. Salbeck, "Spiro Compounds for Organic Optoelectronics," *Chemical Reviews*, 107(4), 1011-1065 (2007).
  - J.H. Noh, N.J. Jeon, Y.C. Choi, M.K. Nazeeruddin, M. Grätzel, S.I. Seok, "Nanostructured TiO<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> heterojunction solar cells employing spiro-OMeTAD/Co-complex as hole-transporting material," *Journal of Materials Chemistry A*, 1(38), 11842-11847 (2013).
  - J. Burschka, F. Kessler, M.K. Nazeeruddin, M. Grätzel, "Co (III) Complexes as p-Dopants in Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells," *Chemistry of Materials*, 25(15), 2986-2990 (2013).
  - S.N. Habisreutinger, N.K. Noel, H.J. Snaith, R.J. Nicholas, "Investigating the Role of 4-Tert Butylpyridine in Perovskite Solar Cells," *Advanced Energy Materials*, 7(1), 1601079 (2017).
  - Z. Hawash, L.K. Ono, S.R. Raga, M.V. Lee, Y. Qi, "Air-Exposure Induced Dopant Redistribution and Energy Level Shifts in Spin-Coated Spiro-MeOTAD Films," *Chemistry of Materials*, 27(2), 562-569 (2015).
  - X. Zhao, H.-S. Kim, J.-Y. Seo, N.-G. Park, "Effect of Selective Contacts on the Thermal Stability of Perovskite Solar Cells," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(8), 7148-7153 (2017).
  - S. Wang, M. Sina, P. Parikh, T. Uekert, B. Shahbazian, A. Devaraj, Y.S. Meng, "Role of 4-tert-Butylpyridine as a Hole Transport Layer Morphological Controller in Perovskite Solar Cells," *Nano Letters*, 16(9), 5594-5600 (2016).
  - E.J. Juarez-Perez, M.R. Leyden, S. Wang, L.K. Ono, Z. Hawash, Y. Qi, "Role of the Dopants on the Morphological and Transport Properties of Spiro-MeOTAD Hole Transport Layer," *Chemistry of Materials*, 28(16), 5702-5709 (2016).
  - A.K. Jena, Y. Numata, M. Ikegami, T. Miyasaka, "Role of spiro-OMeTAD in performance deterioration of perovskite solar cells at high temperature and reuse of the perovskite films to avoid Pb-waste," *Journal of Materials Chemistry A*, 6(5), 2219-2230 (2018).
  - Y. Liu, Q. Chen, H.-S. Duan, H. Zhou, Y. Yang, H. Chen, S. Luo, T.-B. Song, L. Dou, Z. Hong, Y. Yang, "A dopant-free organic hole transport material for efficient planar heterojunction perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, 3(22), 11940-11947 (2015).
  - W. Ke, D. Zhao, C.R. Grice, A.J. Cimaroli, G. Fang, Y. Yan, "Efficient fully-vacuum-processed perovskite solar cells using copper phthalocyanine as hole selective layers," *Journal of Materials Chemistry A*, 3(47), 23888-23894 (2015).
  - L.E. Polander, P. Pahnner, M. Schwarze, M. Saalfrank, C. Koerner, K. Leo, "Hole-transport material variation in fully vacuum deposited perovskite solar cells," *APL Materials*, 2(8), 081503 (2014).
  - N. Marinova, W. Tress, R. Humphry-Baker, M.I. Dar, V. Bojinov, S.M. Zakeeruddin, M.K. Nazeeruddin, M. Grätzel, "Light Harvesting and Charge Recombination in CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Perovskite Solar Cells Studied by Hole Transport Layer Thickness Variation," *ACS Nano*, 9(4), 4200-4209 (2015).
  - Yuzheng Guo and John Robertson, "Origin of the high work function and high conductivity of MoO<sub>3</sub>," *Applied Physics Letter*, 105, 222110 (2014).
  - G.Y. Margulis, B.E. Hardin, I.-K. Ding, E.T. Hoke, M.D. McGehee, "Parasitic Absorption and Internal Quantum Efficiency Measurements of Solid-State Dye Sensitized Solar Cells," *Advanced Energy Materials*, 3(7), 959-966 (2013).