

논문 2025-4-15 <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2025.12.15>

복합 정공 수송층 전략을 통한 페로브스카이트 태양전지 구현

유규리*, 고원준*, 이현욱*, 백상현*†

Perovskite Solar Cells Enabled by a Composite Hole Transport Layer Strategy

Gyuri Yu*, Wonjun Go*, Hyunwook Lee*, Sanghyun Paek*†

요 약

페로브스카이트 태양전지(PSCs)는 높은 광전 변환 효율(PCE)에 도달하고 있지만, 널리 사용되는 정공 수송 물질(HTM)인 Spiro-OMeTAD의 높은 비용과 낮은 안정성으로 인해 상업화에 난항을 겪고 있다. 이를 극복하기 위해, Spiro-OMeTAD를 비용 효율적인 대안 물질과 혼합하는 복합 HTM 전략이 연구되고 있다. 본 연구는 효율적인 정공 추출을 위해 최적화된 HOMO를 갖는 PEH-23 및 PEH-24를 혼합 파트너로 활용하였다. 다양한 부피 비율로 제조된 복합 HTM 소자들을 체계적으로 비교한 결과, 10 부피 퍼센트로 첨가된 PSC 소자는 각각 20.33 %와 20.62 %의 최고 효율을 달성하였다. 따라서 구조적으로 안정한 저분자 물질을 활용한 비용 효율적인 복합 HTM 접근 방식이 PSC 소자의 상업화를 위한 새로운 방안을 제시한다.

Abstract

Perovskite solar cells (PSCs) achieve high power conversion efficiency (PCE), but commercialization faces difficulties due to the high cost and low stability of the widely-used hole-transporting material (HTM), Spiro-OMeTAD. To overcome this, the composite HTM strategy, which blends Spiro-OMeTAD with cost-effective alternatives, is being investigated. The mixing partners, PEH-23 and PEH-24, suggested our previous work, is optimized HOMO energy levels for efficient hole extraction. Resulting from a systematic comparison of composite HTM devices prepared at various volume ratios, devices incorporating 10 vol% achieved champion efficiencies of 20.33 % and 20.62 %, respectively. Therefore, this research validates that the cost-efficient composite HTM approach, utilizing structurally stable small-molecule materials, is alternative route for the commercialization of PSC devices.

한글키워드 : 페로브스카이트 태양전지, 정공 수송층, 복합 정공 수송 물질, 광전변환효율, 유기합성

keywords : Perovskite solar cell, Hole transporting materials, composite HTMs, power conversion efficiency, organic synthesis

* 상명대학교 화학에너지 공학

† 교신저자: 백상현(email: sanghyun.paek@smu.ac.kr)

접수일자: 2025.12.02. 심사완료: 2025.12.12.

게재확정: 2025.12.20.

1. 서 론

환경에 미치는 화석 연료의 부정적인 영향으

로 인해 재생 에너지원에 대한 연구의 필요성이 늘었고, 태양 에너지를 전기 에너지로 변환하는 태양광 기술 개발에 많은 연구가 집중되고 있다. 그중에서 페로브스카이트 태양전지, PSC는 실리콘 태양전지에 비해 저렴한 비용, 간단한 제작 방법, 그리고 넓은 스펙트럼에 걸친 강한 광 흡수 능력과 같은 여러 장점으로 인해 재생 가능한 청정 에너지 기술의 잠재적 후보로서 주목 받고 있다[1-5]. PSC의 광전 변환 효율은 2009년 초기 3.8 %에서 시작하여 오늘날 미국 국립재생에너지연구소 (NREL)에서 발표한 바에 따르면 약 27 % 수준에 도달하였다[6-7]. 이러한 전례 없는 발전 속도 덕분에 PSC는 가장 빠르게 발전하는 태양광 기술로 간주된다.

고효율 PSC 소자는 일반적으로 전자 수송층, ETL과 정공 수송층, HTL 사이에 페로브스카이트 광흡수체가 위치하는 구조를 가지며, 전하 수송층은 전하 추출을 돕고 습기 및 열화에 민감한 페로브스카이트 필름을 보호하는 데 중추적인 역할을 한다. 특히 정공 전달 물질, HTM은 정공 추출 촉진, 전하 재결합 억제, 표면 결함 패시베이션과 같은 핵심 기능을 수행하며 소자의 광전 변환 효율, PCE와 장기 안정성에 직접적인 영향을 미친다[8-10]. 현재 고성능 PSC의 n-i-p 구조에서 2,2',7,7'-tetrakis(N,N-di-p-methoxyphenyl-amine)-9,9'-spirofluorene (Spiro -OMeTAD)이 가장 널리 사용되는 유기 HTM으로 알려져 있다 [11-15].

그러나 Spiro-OMeTAD는 높은 비용과 복잡한 합성 및 정제 절차, 낮은 이동도 및 안정성 등 상업화를 저해하는 근본적인 한계도 가진다 [16-18]. 따라서 이러한 단점들을 극복하기 위해, 최근 두 가지 이상의 서로 다른 HTM을 혼합하여 사용하는 복합 HTM 전략이 효과적인 해결책으로 주목받고 있다[19-23]. 이 전략은 단일 구성 요소가 갖는 단점을 상호 보완하고 각 HTM의

시너지 효과를 창출하여 전하 수송 및 재결합 과정에서 긍정적인 영향으로 전반적인 소자 성능과 안정성을 개선하는 것을 목표로 한다.

Spiro-OMeTAD와 다른 HTM으로 구성된 복합 HTM은 HTL의 에너지 준위, 특히 HOMO 레벨을 정밀하게 제어할 수 있는 유용한 수단이다. 단일 HTM을 사용할 경우 페로브스카이트의 가전자대 (Valance band, VB)와 최적화된 에너지 준위 정렬을 이루기 어렵기 때문에 개방 전압 (V_{oc}) 손실이 발생할 수 있다. 그러나 두 가지 HTM을 혼합하고 그 비율을 조절함으로써 HOMO 레벨을 선형적으로 튜닝하여 페로브스카이트 층과의 에너지 장벽을 최소화하고 정공 추출 효율을 극대화할 수 있다[24]. 또한 구조적으로 견고하고 평면성이 우수한 콘จู게이션 저분자를 Spiro-OMeTAD와 혼합할 경우, 필름의 형태학적 특성을 획기적으로 개선할 수 있다. Spiro-OMeTAD의 3차원적 스피로 구조는 분자간 거리가 멀어 π - π 스택킹이 약하고 필름 형성 시 공극이나 편홀이 발생하기 쉽다[25-26]. 이때 평면 구조를 가진 저분자 HTM을 도입하면 Spiro-OMeTAD 매트릭스 내의 빈 공간을 채우고 분자 패킹 밀도를 높여 전하 이동도를 향상시킬 뿐만 아니라, 더욱 매끄럽고 균일한 필름 표면을 형성하여 계면 저항을 줄이는 데 기여한다. 다음으로, 복합 HTM에 포함된 기능성 분자들은 페로브스카이트 표면의 결함을 효과적으로 패시베이션하는 역할을 한다. 특히 S, N, O와 같은 헤테로 원자를 포함하는 루이스 염기 기반의 저분자 물질들은 페로브스카이트 표면의 배위되지 않은 Pb^{2+} 결함과 상호작용하여 트랩 밀도를 낮추고 비방사 재결합을 억제한다[26-28]. 이는 소자의 효율 향상뿐만 아니라 히스테리시스 감소에도 긍정적인 영향을 준다. 마지막으로, 소수성이 뛰어난 저분자 물질과의 혼합은 수분 침투에 대한 저항성을 크게 강화한다. 기존

Spiro-OMeTAD 필름은 도펀트의 친수성으로 인해 수분에 취약한 반면, 알킬 사슬 등을 포함하여 소수성이 향상된 복합 HTM은 페로브스카이트 층을 수분으로부터 효과적으로 차단하는 보호막 역할을 수행하여 고습 환경에서도 소자의 장기 작동 안정성을 보장한다[29-31].

이러한 맥락에서 Spiro-OMeTAD의 성능을 보완하고 비용 효율성을 높이기 위해, 선행 연구에서 합성한 PEH-23과 PEH-24를 혼합 파트너로 제시한다. (그림 1) 이 두 물질은 2,2-벤조다이티오펜과 벤젠 브릿지 코어를 기반으로 하는 이 두 물질은 확장된 콘주게이션을 통해 우수한 정공 수송 능력을 보유하며, 특히 긴 콘주게이션 길이와 구조적 안정성으로 인해 Spiro-OMeTAD 기반 소자의 안정성 문제를 보완할 수 있는 비용 효율적 후보이다. 특히, PEH-23과 PEH-24는 각각 2.8 eV와 3.1 eV의 광학적 밴드갭을 나타내어 Spiro-OMeTAD (~3.0 eV)와 광학적으로 유사한 특성을 보일 뿐만 아니라, 적절한 HOMO 에너지 준위(-5.3 eV)를 형성하여 페로브스카이트 층

과의 에너지 장벽을 최소화하고 정공 추출 효율을 극대화할 수 있다.

본 연구에서는 Spiro-OMeTAD에 PEH-23 및 PEH-24를 다양한 비율로 혼합하여 복합 HTM을 제조하고, 이것이 소자의 광전기적 특성과 안정성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 그 결과, 최적화된 복합 HTM은 단일 Spiro-OMeTAD 대비 효율적인 전하 추출 능력과 균일하고 매끄러운 필름 형상을 나타내었다. 이를 바탕으로 제작된 PSC는 각각 20.33 %, 20.62 %의 최고 효율을 달성하였다. 따라서 본 연구는 구조적으로 안정한 저분자 물질을 활용한 복합 HTM 전략이 상업화 및 대량 생산을 위한 비용 효율적인 해결책을 제시한다.

2. 소자제작 및 방법

2.1 PSC 소자 제작

에칭되어진 FTO기판(Philkington, TEC8, $8 \Omega \text{ cm}^{-2}$)은 계면활성제 수용액, 아세톤, 이소프로판올을 사용하여 각 30분씩 세척하였다. 30분 동안 UV-O₃ 처리를 한 뒤, SnO₂ 콜로이드 용액을 3000 rpm에서 30초 동안 스핀코팅 하고, 150 °C에서 1시간 동안 어닐링하였다. 페로브스카이트 전구체는 DMF와 DMSO (8:1, v:v) 혼합 용매에 1.4M FAI, 1.4M PbI₂, 0.07M MABr, 0.07M PbBr₂ 0.5M MACl을 혼합하여 제작하였다. 만들어진 전구체 용액을 이용하여 500 rpm 5초, 1000 rpm 5초, 5000 rpm에서 30초로 스핀코팅을 통해 도포하였다. 스핀코팅이 끝나기 10초 전에 안티솔벤트로 디에틸에테르 800 μL 를 드롭캐스팅 하였다. 이후 150 °C에서 열처리를 하여 페로브스카이트 박막을 형성하였다. 홀 전달 물질 용액은 CB에 75 mM로 녹인 Spiro-OMeTAD에 도펀트로 Li-TFSI (520 mg/mL in acetanilide) 용액과

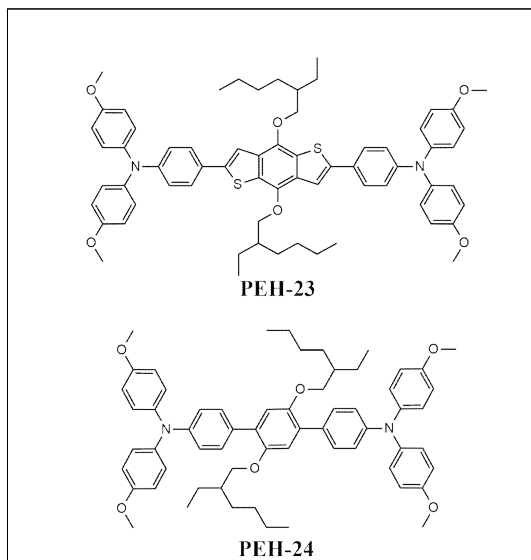


그림 1. PEH-23과 PEH-24의 분자 구조
Fig. 1. Molecular structures of PEH-23 and PEH-24.

4-tBP를 당량에 맞춰 첨가한다. CB에 90 mg/mL로 녹인 PEH-23 용액과 PEH-24 용액을 각각 부피 퍼센트 5 %, 10 %, 20 %로 준비된 Spiro-OMeTAD 용액에 섞는다. 준비된 홀 전달 물질 용액은 3000 rpm에서 30초 동안 스핀코팅 하여 기판위에 도포하였다. 이후 100 nm 두께의 Ag 전극을 증착하였다.

2.2 광학 분석 장비

모든 분석은 유리 기판 위에 제작된 페로브스카이트 박막에 대해 수행되었다. 단, 광전기화학 분석은 FTO 기판을 사용하여 진행하였다. 태양 전지 성능 측정은 Ivium 소프트웨어가 포함된 Peccell의 PEC-L01을 사용하여 50 mV s^{-1} 의 스캔 속도로 표준 모사 AM 1.5G 조사 조건 하에서 분석하였다. 외부양자효율(EQE)은 HS Technologies의 PEIPCE 상용 시스템을 사용하여 측정하였다. 자외선-가시광선 스펙트럼 (UV-VIS)은 CARY 5000으로 200-800 nm의 파장 범

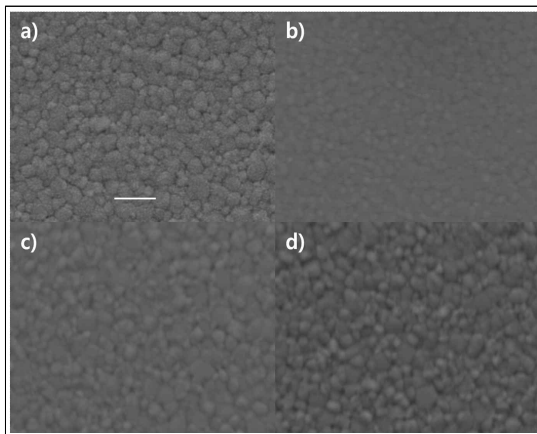


그림 2. SEM 이미지. (scale bar : 5 μm)
a) Perovskite, b) Spiro-OMeTAD,
c) PEH-23 + Spiro-OMeTAD,
d) PEH-24 + Spiro-OMeTAD

Fig. 2. SEM images. (Scale bar: 5 μm)
a) Perovskite, b) Spiro-OMeTAD,
c) PEH-23 + Spiro-OMeTAD,
d) PEH-24 + Spiro-OMeTAD

위에서 분석하였다. 광발광(PL) 스펙트럼은 형광 분광계 FL 6500을 통해 500-800 nm 의 파장 범위에서 측정하였다. 단면 주사 전자 현미경 (SEM) 이미지는 JEOL의 JSM 5600LV에서 촬영하였다.

3. HTM 광학 분석 및 소자 효율

3.1 소자의 표면 분석

서로 다른 정공 수송 물질을 사용하여 형성된 박막들의 표면 분석을 위해 전자 주사 현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM)을 이용한 분석을 진행하였고, 결과를 그림 2에 나타내었다. 모든 박막은 FTO/SnO₂/Perovskite/HTL 구조를 갖는 소자를 제작하여 분석을 진행하였으며 소자에 사용된 광흡수층은 (FAPbI₃)_{0.95}(MAPbBr₃)_{0.05}이다. 상면부 (top view) SEM 이미지 촬영을 통해 PEH-23과 PEH-24를 첨가한 Spiro-OMeTAD 모두 기존의 페로브스카이트 박막과 비교했을 때 균일하게 박막이 형성되어 있음을 확인했다.

3.2 소자 표면의 광전기적 특성 분석

새롭게 제시된 복합 HTM들이 태양전지에서 정상적인 광학적 특성을 나타내는지 확인하기 위해, 해당 HTM들의 필름 상태에서의 광학적 특성을 분석하였다. 측정을 위한 샘플은 FTO/Perovskite/HTM 구성으로 제작하여 만들어진 샘플의 PL quenching 스펙트럼을 측정하였다. Spiro-OMeTAD와 PEH-23 또는 PEH-24를 혼합한 소자의 경우, 그 비율이 90:10 (v/v) 이다. 530 nm의 파장빛을 조사한 후 780~800 nm 범위에서 방출된 발광 스펙트럼을 측정하여 그림 3 a) 의 결과를 얻었다. 각각의 HTM이 도핑 되었을 때, 광흡수층에서 만들어진 홀이 HTM에 잘 전달됨을 확인 하였다. 이는 적절한 HOMO의 레

벨을 확인함과 동시에 소자의 구동에 대한 기대를 갖을 수 있었다.

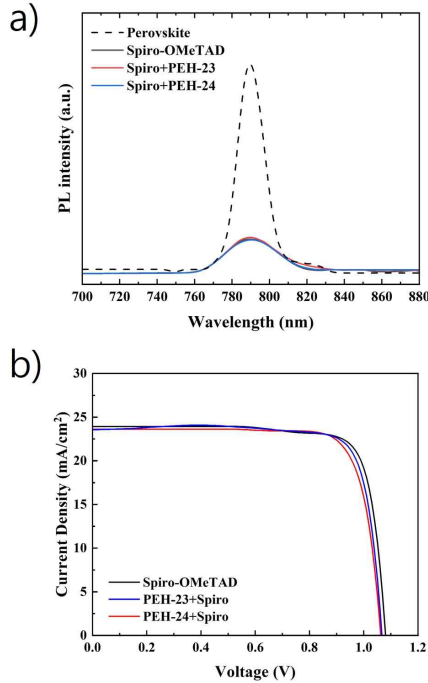


그림 3. a) 혼합 HTM의 PL quenching 측정, b) 혼합 HTM에 따른 광전변환 효율 측정
Fig. 3. a) PL quenching measurements of mixed HTMs, b) Power conversion efficiency measurements of mixed HTMs

PEH-23과 PEH-24를 Spiro-OMeTAD와 혼합했을 때, 기존의 Spiro-OMeTAD와 PL 강도의 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아, 홀의 분리 및 추출 능력이 유지되었음을 알 수 있다.

3.3 복합 HTM을 활용한 광전변환 효율

HTM의 구동을 확인하기 위하여 본 연구진은 FTO/SnO₂/Perovskite/HTM/Ag의 구조를 갖는 소자를 제작하여 효율을 측정하였다. 그림 3 b)는 광 흡수체로 (FAPbI₃)_{0.95}(MAPbBr₃)_{0.05}로 조성된 페로브스카이트를 사용하였고 표준 전역 AM

1.5 조명 하의 전류 밀도-전압 (J-V) 그래프를 나타내었다. Spiro-OMeTAD와 PEH-23을 혼합한 복합 HTM을 사용한 소자는 10 부피 퍼센트로 첨가하였을 때 가장 높은 효율을 보였으며, 20.33 %의 효율, 단락 전류 밀도 (J_{sc})는 23.63 mA/cm², 개방 전압 (V_{oc})는 1.06 V, 곡선인자 (FF) 81.19로 측정되었다. Spiro-OMeTAD와 PEH-24를 혼합한 복합 HTM을 사용한 소자 또한 10 부피 퍼센트로 첨가하였을 때 가장 높은 효율을 나타냈으며, 이때의 효율은 20.62 %이고 Spiro-OMeTAD를 단일 HTM으로 사용한 소자의 효율은 20.94 %이다. 그림 4에는 PEH-23 및

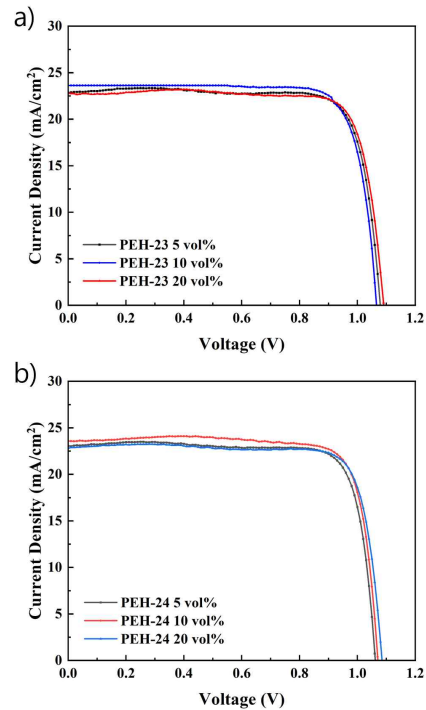


그림 4. a) PEH-23과 Spiro-OMeTAD 조성비에 따른 J-V 측정값, b) PEH-24과 Spiro-OMeTAD 조성비에 따른 J-V 측정값
Fig. 4. a) J-V measurements according to the composition ratio of PEH-23 and Spiro-OMeTAD, b) J-V measurements according to the composition ratio of PEH-24 and Spiro-OMeTAD

PEH-24를 Spiro-OMeTAD를 각각 5 vol%, 10 vol%, 20 vol%로 혼합하였을 때 광전 효율 측정 결과를 나타내었다. 그림 4에서 보듯이 PEH-23과 PEH-24의 부피비가 5%일 때 보다 10% 일 때 증가함을 확인하였고, 10% 보다 더 증가시켰을 때에는 곡선인자가 낮아져 전체적인 광전변환 효율이 낮게 측정되었다.

따라서 고비용 물질인 Spiro-OMeTAD를 저비용의 PEH-23과 PEH-24로 일부 대체하여 유사한 성능의 소자를 제작함으로써 PSC의 상용화에 핵심적인 요소인 비용 효율성을 개선하면서도, 광전지 특성의 저하를 최소화하는 유망한 해결책을 입증한다.

4. 결 론

본 연구는 페로브스카이트 태양전지 상용화의 주요 과제인 HTM의 비용 효율성 문제를 해결하고자 기존의 고비용 물질인 Spiro-OMeTAD를 비교적 값싼 합성 물질인 PEH-23과 PEH-24를 혼합 파트너로 활용하여 일부 대체하는 복합 HTM 전략을 세웠다. 최적화된 복합 HTM은 단일 Spiro-OMeTAD 대비 더욱 효율적인 정공 추출 능력과 균일하고 매끄러운 필름 형상을 나타내었으며, 이를 바탕으로 제작된 PSC는 20.33 %, 20.62 %의 최고 효율을 달성하며 Spiro-OMeTAD만 사용한 단일 소자와 유사한 경쟁력 있는 성능 수준을 보였다. 따라서 고비용 물질을 구조적으로 안정한 저분자 물질로 일부 대체하여 유사한 성능의 소자를 제작함으로써, 페로브스카이트 태양전지 상업화를 위한 대체 가능한 경로를 시사하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, H. J. Snaith, "Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites", *Science*, 338(6107), pp.643-647, Oct. 4, 2012, DOI : <https://doi.org/10.1126/science.1228604>
- [2] S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M. J. P. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza and H. J. Snaith, "Electron-Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber", *Science*, 342(6156) pp. 341-344, Oct. 18, 2013, DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1243982>
- [3] V. D'Innocenzo, G. Grancini, M. J. P. Alcocer, A. R. S. Kandada, S. D. Stranks, M. M. Lee, G. Lanzani, H. J. Snaith and A. Petrozza, "Excitons versus free charges in organo-lead tri-halide perovskites", *Nature Communications*, 5, pp.3586, Apr. 08, 2014, DOI : <https://doi.org/10.1038/ncomms4586>
- [4] T. Wang, J. Yang, Q. Cao, X. Pu, Y. Li, H. Chen, J. Zhao, Y. Zhang, X. Chen, X. Li, "Room temperature nondestructive encapsulation via self-crosslinked fluorosilicone polymer enables damp heat-stable sustainable perovskite solar cells", *Nature Communications*, 14, pp.1342, Mar. 11, 2023, DOI : <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36918-x>
- [5] J. Xia, P. Luizys, M. Daskeviciene, C. Xiao, K. Kantminiene, V. Jankauskas, K. Rakstys, G. Kreiza, X. Gao, H. Kanda, K. G. Brooks, I. R. Alwani, Q. U. Ain, J. Zou, G. Shao, R. Hu, Z. Qiu, A. Slonopas, A. M. Asiri, Y. Zhang, P. J. Dyson, V. Getautis and M. K. Nazeeruddin, "Foldable Hole-Transporting Materials for Merging

- Electronic States between Defective and Perfect Perovskite Sites”, *Advanced Materials*, 35(25), pp.2300720, Mar. 19, 2023, DOI : <https://doi.org/10.1002/adma.202300720>
- [6] M. A. Green, E. D. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefert, D. Hinken, M. Rauer, J. Hohl-Ebinger and X. Hao, “Solar cell efficiency tables (Version 64)”, *Progress in Photovoltaics*, 32(7), pp.425–441, Jul. 02, 2024, DOI : <https://doi.org/10.1002/pip.3831>
- [7] NREL, “Best Research–Cell Efficiency Chart”, 2025, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>
- [8] L. Wang, M. Shahiduzzaman, E. Y. Muslih, M. Nakano, M. Karakawa, K. Tomita, O. Lebel, J. M. Nunzi and T. Taima, “Dopant-Free Mexylaminotriazine Molecular Glass Hole Transport Layer for Perovskite Solar Cells”, *ACS Applied Energy Materials*, 4(11), pp.12232–12242, Oct. 20, 2021, DOI : <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c02013>
- [9] H. K. Kim, J. W. Lee, G. R. Han, Y. J. Kim, S. H. Kim, S. K. Kim, S. K. Kwak and J. H. Oh, “Highly Efficient Hole Transport Layer-Free Low Bandgap Mixed Pb–Sn Perovskite Solar Cells Enabled by a Binary Additive System”, *Advanced Functional Materials*, 32(12), pp.2110069, Dec. 04, 2022, DOI : <https://doi.org/10.1002/adfm.202110069>
- [10] C. H. Tien, W. C. Lin and L. C. Chen, “Efficient Perovskite Solar Cells via Phenethylamine Iodide Cation-Modified Hole Transport Layer/Perovskite Interface”, *ACS Omega*, 7(42), pp.37359–37368, Oct. 14, 2022, DOI : <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03976>
- [11] J. Salbeck, N. Yu, J. Bauer, F. Weissörtel and H. Bestgen, “Low molecular organic glasses for blue electroluminescence”, *Synthetic Metals*, 91(1–3), pp.209–215, Dec. 1997, DOI : [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(98\)80033-7](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(98)80033-7)
- [12] U. Bach, D. Lupo, P. Comte, J. E. Moser, F. Weissörtel, J. Salbeck, H. Spreitzer and M. Grätzel, “Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO₂ solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies”, *Nature*, 395, pp.583–585, Oct. 08. 1998, <https://www.nature.com/articles/26936#citations>
- [13] M. J. Kim, J. Jeong, H. Lu, T. K. Lee, F. T. Eickemeyer, Y. Liu, I. W. Choi, S. J. Choi, Y. H. Jo, H. B. Kim, S. I. Mo, Y. K. Kim, H. J. Lee, N. G. An, S. U. Cho, W. R. Tress, S. M. Zakeeruddin, A. Hagfeldt, J. Y. Kim, M. Grätzel and D. S. Kim, “Conformal quantum dot - SnO₂ layers as electron transporters for efficient perovskite solar cells”, *Science*, 375(6578), pp.302–306, Jan. 20, 2022, DOI : <https://doi.org/10.1126/science.abh1885>
- [14] J. Lu, T. Yang, T. Niu, N. Bu, Y. Zhang, S. Wang, J. Fang, X. Chang, T. Luo, J. Wen, Y. Yang, Z. Ding, K. Zhao and S. Liu “Formamidinium-based Ruddlesden - Popper perovskite films fabricated via two-step sequential deposition: quantum well formation, physical properties and film-based solar cells”, *Energy & Environmental Science*, 15(3), pp.1144–1155, Jan. 14, 2022, DOI : <https://doi.org/10.1039/D1EE02851K>
- [15] J. Suo, B. Yang, E. Mosconi, D. Bogachuk, T. A. S. Doherty, K. Frohna, D. J. Kubicki, F. Fu, Y. Kim, O. Er-Raji, T. Zhang, L. Baldinelli, L. Wagner, A. N. Tiwari, F. Gao, A. Hinsch, S. D. Stranks, F. De Angelis and A. Hagfeldt, “Multifunctional sulfonium-based treatment for perovskite solar cells with less than 1% efficiency loss over 4,500-h operational stability tests”, *Nature Energy*, 9, pp.172–183, Jan. 04, 2024, DOI : <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01421-6>

- [16] L. Yang, B. Xu, D. Bi, H. Tian, G. Boschloo, L. Sun, A. Hagfeldt and E. M. J. Johansson, "Initial light soaking treatment enables hole transport material to outperform spiro-OMeTAD in solid-state dye-sensitized solar cells", *Journal of the America Chemical Society*, 135(19), pp. 7378-7385, May, 15, 2013, DOI : <https://doi.org/10.1021/ja403344s>
- [17] Z. Zhang, B. Qi, Z. Jin, D. Chi, Z. Qi, Y. Li and J. Wang, "Perylene diimides: a thickness-insensitive cathode interlayer for high performance polymer solar cells", *Energy and Environmental Science*, 7(6), pp.1966-1973, Mar, 17, 2014, DOI : <https://doi.org/10.1039/C4EE00022F>
- [18] T. Malinauskas, D. Tomkute-Luksiene, R. Sens, M. Daskeviciene, R. Send, H. Wonneberger, V. Jankauskas, I. Bruder and V. Getautis, "Enhancing Thermal Stability and Lifetime of Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells via Molecular Engineering of the Hole-Transporting Material Spiro-OMeTAD", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(21), pp. 11107-11116, May, 08, 2015, DOI : <https://doi.org/10.1021/am5090385>
- [19] X. Yin, C. Wang, D. Zhao, N. Shrestha, C. R. Grice, L. Guan, Z. Song, C. Chen, C. Li, G. Chi, B. Zhou, J. Yu, Z. Zhang, R. J. Ellingson, J. Zhou, Y. Yan and W. Tang, "Binary hole transport materials blending to linearly tune HOMO level for high efficiency and stable perovskite solar cells", *Nano Energy*, 51, pp. 680 - 687, July 18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.07.027>
- [20] X. Ji, T. Zhou, X. Ke, W. Wang, S. Wu, M. Zhang, D. Lu, X. Zhang and Y. Liu, "A mixed hole transport material employing a highly planar conjugated molecule for efficient and stable perovskite solar cells", *Journal of Materials Chemistry A*, 8(10), pp. 5163-5170, Feb, 07, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1039/C9TA13365H>
- [21] A. Velusamy, S. N. Afraj, Y. S. Guo, J. S. Ni, H. L. Huang, T. Y. Su, Y. Ezhumalai, C. L. Liu, C. H. Chiang, M. C. Chen and C. G. Wu, "Bicyclopentadithiophene-Based Organic Semiconductor for Stable and High-Performance Perovskite Solar Cells Exceeding 22%", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(5), pp. 6162 - 6175, Jan. 26, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.3c15774>
- [22] Y. J. Chang, N. H. Chen, T. Y. Chen, Y. M. Shuang and Y. S. Yen, "Enhancing Efficiency and Stability in Perovskite Solar Cells Through Blended Hole Transporting Materials Incorporating Benzo[g]quinoxaline-Conjugated Small Molecules", *ACS Applied Energy Materials*, 7(3), pp. 1287-1297, Jan. 12, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaem.3c02932>
- [23] J. Vailassery, G. Z. Wubie, J. W. She, W. T. Wu, H. H. Yu and S. S. Sun, "Composite Hole-Transporting Materials Based on 9,10- Dimethoxyphenanthrene Cores and Spiro-OMeTAD for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells", *ACS Omega*, 10(20), pp. 20638-20648, May. 14, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c01513>
- [24] L. Dou, Y. Liu, Z. Hong, G. Li and Y. Yang, "Low-Bandgap Near-IR Conjugated Polymers/Molecules for Organic Electronics", *Chemical Reviews*, 115(23), pp. 12633-12665, Aug. 19, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00165>
- [25] Y. Liu, Z. Hong, Q. Chen, H. Chen, W. H. Chang, Y. M. Yang, T. B. Song and Y. Yang, "Perovskite Solar Cells Employing Dopant-Free Organic Hole Transport Materials with Tunable Energy Levels", *Advanced Materials*, 28(3), pp. 440-446, Nov. 20, 2015, DOI:

- <https://doi.org/10.1002/adma.201504293>
- [26] D. Liu, B. Kan, X. Ke, N. Zheng, Z. Xie, D. Lu and Y. Liu, "Extended Conjugation Length of Nonfullerene Acceptors with Improved Planarity via Noncovalent Interactions for High-Performance Organic Solar Cells", *Advanced Energy Materials*, 8(26), pp. 1801618, Aug. 02, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201801618>
- [27] H. Yao, Y. Cui, R. Yu, B. Gao, H. Zhang and J. Hou, "Design, Synthesis, and Photovoltaic Characterization of a Small Molecular Acceptor with an Ultra-Narrow Band Gap", *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 56(11), pp. 3045-3049, Feb. 01, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201610944>
- [28] L. Yang, M. Li, J. Song, Y. Zhou, Z. Bo and H. Wang, "Molecular Consideration for Small Molecular Acceptors Based on Ladder-Type Dipyran: Influences of O-Functionalization and π -Bridges", *Advanced Functional Materials*, 28(8), pp. 1705927, Jan. 17, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201705927>
- [29] C. Shen, Y. Wu, H. Zhang, E. Li, W. Zhang, X. Xu, W. Wu, H. Tian and W. H. Zhu, "Semi Locked Tetrathienylethene as a Building Block for Hole Transporting Materials: Toward Efficient and Stable Perovskite Solar Cells", *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 58(12), pp. 3784-3789, Jan. 30, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201811593>
- [30] X. Yin, J. Zhou, Z. Song, Z. Dong, Q. Bao, N. Shrestha, S. S. Bista, R. J. Ellingson, Y. Yan and W. Tang, "Dithieno[3,2-b:2',3'-d]pyrrol-Cored Hole Transport Material Enabling Over 21% Efficiency Dopant-Free Perovskite Solar Cells", *Advanced Functional Materials*, 29(38), pp. 1904300, Jul. 15, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201904300>
- [31] J. Zhou, X. Yin, Z. Dong, A. Ali, Z. Song, N. Shrestha, S. S. Bista, Q. Bao, R. J. Ellingson, Y. Yan and W. Tang, "Dithieno[3,2-b:2',3'-d]pyrrole Cored p-Type Semiconductors Enabling 20 % Efficiency Dopant-Free Perovskite Solar Cells", *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 58(39), pp. 13717-13721, Jul. 08, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201905624>

 저 자 소 개



유규리(Gyuri Yu)

2024.2 상명대학교 화학에너지공학과 졸업
 2024.3-현재 : 상명대학교 화학에너지공학과
 에너지유기재료 석사과정 재학



고원준(Wonjun Go)

2025.2 상명대학교 화학에너지공학과 졸업
 2025.3-현재 : 상명대학교 화학에너지공학과
 에너지유기재료 석사과정 재학



이현욱(Hyunwook Lee)

2025.2 상명대학교 화학에너지공학과 졸업
2025.3-현재 : 상명대학교 화학에너지공학과
에너지유기재료 석사과정 재학



백상현(Sanghyun Paek)

2007.2 고려대학교 화학과 졸업
2009.2 고려대학교 소재화학 석사
2013.2 고려대학교 태양전지소재 박사
2014.9-2020.2 EPFL 박사후 연구원
2020.3-현재 : 상명대학교 교수
<주관심분야> 에너지, 페로브스카이트 태양전지, 유기합성 재료