

할라이드 페로브스카이트 소재를 이용한 전자 소자에 관한 리뷰

박형기¹ , 양정엽² 

¹ 군산대학교 기초과학연구소

² 군산대학교 에너지신산업학부

A Review of Electronic Devices Based on Halide Perovskite Materials

Hyeong Gi Park¹ and Jungyup Yang²

¹ The Institute of Basic Science, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

² Department of Energy Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

(Received May 9, 2024; Revised May 28, 2024; Accepted May 29, 2024)

Abstract : This review examines the use of halide perovskite materials in electronic devices, highlighting their exceptional optoelectronic properties and the challenges associated with them. Despite their potential for high-performance devices, practical applications are limited by sensitivity to environmental factors such as moisture and oxygen, etc. We discuss advances in enhancing stability and operational reliability, featuring innovative synthesis methods and device engineering strategies that help mitigate degradation. Furthermore, we explore the integration of perovskites in applications such as field-effect transistors and LEDs, emphasizing their transformative potential. This review also outlines future research directions, stressing the need for ongoing improvements in material stability and device integration to fully realize the commercial potential of perovskites.

Keywords: Halide perovskite, Field-effect transistor, Hole mobility, Optoelectronic devices, Polymer coating

1. 서론

최근 몇 년간 할라이드 페로브스카이트(halide Perovskites) 소재는 전계효과 트랜지스터(field-effect transistors, FET) 및 광전자 소자 분야에서 주목을 받아왔는데 높은 광 흡수 계수, 조절 가능한 에너지 밴드갭, 우수한 전하 운반 특성을 비롯하여 뛰어난 물리, 화학적 특성을 지니고 있다 [1]. 이러한 특성들 덕분에 비교적 간단한 합성 방법으로 고효율 및 고성능 소자를 제작할 수 있으며, 실용화 가능성을 높여 주고 있다 [2]. 할라이드 페로브스카이트는 공기 중의 산소나 수분에 장시간 노출될 경우 특성 저하

로 이어져 소자 응용 범위가 제한적인데 이는 결정 구조가 이온 결합에서 기인한다 [3,4]. 바꾸어 말하자면 온·습도, 극성 용매 및 화학 가스와 같이 외부 환경에 인해 소자 특성이 크게 변화할 수 있음을 의미한다. 이러한 문제에도 불구하고, 할라이드 페로브스카이트는 여전히 센서, 발광 다이오드(light emitting diode, LED), X-선 감지기, 카메라용 이미지센서, 레이저, 차세대 반도체 소자 등에 응용할 수 있으며 이는 광학적, 전기적으로 우수한 특성과 저온에서의 결정화 가능성, 저렴한 제작 비용의 장점 때문이다 [5-11]. 본 논문의 목적은 할라이드 페로브스카이트 소재의 기초적인 내용을 시작으로 이 소재를 활용한 전계효과 트랜지스터 소자의 최신 연구와 주요 기술 도전 과제와 가능한 해결 방안을 논의하여 미래 연구에 대해 전망하고자 한다. 이러한 종합적 리뷰는 연구자에게 유용한 정보 제공과 방향을 제시하는 것이다.

✉ Hyeong Gi Park; hspark007@gmail.com

Jungyup Yang; Jungyup.yang@kunsan.ac.kr

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
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.

2. 할라이드 페로브스카이트 소재의 기초

그림 1은 할라이드 페로브스카이트 소재의 ABX_3 형태의 일반화된 화학식을 가진 구조로, A는 양이온(예: 메틸 암모늄 $[MA^+]$, 포름아미듐 $[FA^+]$ 혹은 세슘 $[Cs^+]$), B는 금속 양이온(예: Pb^{2+} , Sn^{2+}), X는 할라이드 이온(예: I^- , Br^- , Cl^-)으로 구성된다 [12]. 아래 그림에서 페로브스카이트 결정은 코너 공유(BX6)를 특징으로 하는데 4개의 팔면체 구조로 금속 s 오비탈과 할로겐 p 오비탈이 연속적으로 겹치면서 등방 형태로 배열되어 있고 s-p-s 오비탈 사이의 결합각이 180도에 이르면 중첩이 최대화되어 넓은 분산 에너지 밴드와 감소된 유효질량을 가지는데, 이 구조는 다양한 화학적 조성과 구조적 변형을 허용하여, 높은 광 흡수 계수, 조절 가능한 밴드갭, 우수한 전하 운반 등의 뛰어난 광학적 및 전기적 성질을 제공한다 [12]. 구조적 다양성은 온도, 압력, 조성에 따라 변화하며, A 위치의 이온 크기가 중요한 역할을 하여 B 위치의 금속 이온과 X 위치의 할라이드 이온과의 상호작용에 영향을 미친다. 조성 및 도핑 변화를 통해, 예를 들어 MA^+ 를 FA^+ 로 대체하거나 B 위치에 Sn^{2+} 를 도입함으로써, 밴드갭을 미세 조정하고 전하 운반 특성을 개선하며, 더 넓은 온도 범위에서 구조적 안정성을 얻을 수 있다. 이러한 특성 덕분에 할라이드 페로브스카이트의 태양전지, LED, 광감지기 등 다양한 광전 장치에서 높은 성능을 발휘할 수 있다.

3. 할라이드 페로브스카이트 반도체 소자의 응용

할라이드 페로브스카이트 소재는 전계효과 트랜지스터로 적용하는데 있어 전압 제어에 의해 전기를 스위치 역할을 하는 3단자 형태의 트랜지스터로 소스(source), 게이트(gate), 드레인(drain)으로 구성되어 있다 [13]. 표 1은 반

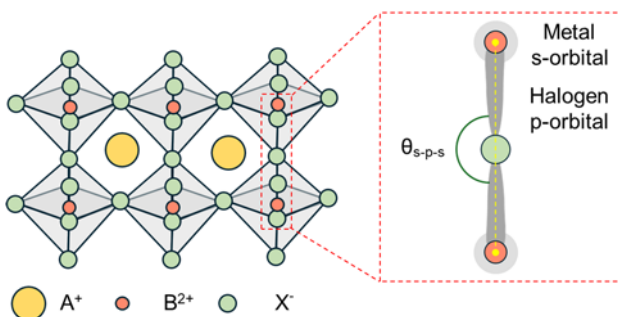


Fig. 1. Basic structure of halide perovskite (orbital overlap between metal s orbital and halogen p orbital) [12].

도체 소재인 페로브스카이트의 FET는 게이트가 하부 혹은 상부에 위치에 따라 4종류의 형태로 구성되어 있는데 가장 흔한 SiO_2/Si 기반의 bottom gate 구조는 제작에 있어 단순함 때문에 자주 활용하는 구조다 (표 1) [12]. 반면에 top gate 구조는 용액 처리와 post-deposition modification을 페로브스카이트층 혹은 유전체층 (dielectric layer) 증착 이후에 수행하여 소자의 전하 수송 특성과 안정성을 개선하기 위해 사용하는 이점이 있다. 유전체층의 커패시턴스(capacitance)는 구동 전압을 결정하며, 저전압에서의 구동을 위해 얇고 고유전율의 유전체층이 필요하다. 또한, 트랜지스터의 기하학적 구조와 전극의 중첩은 최대 작동 주파수와 전력 소모에 중요한 영향을 미친다.

Kagan 그룹(그림 2)과 Mitzi 그룹이 연구한 페로브스카이트 소재는 모두 구조적으로 유사하나 몇 가지 차이점이 있다. Kagan 그룹은 페닐에틸암모늄 주석(II) 요오드화물 ($C_6H_5C_2H_4NH_3$) $_2SnI_4$ 을 채널층으로 하여 스피ن 코팅법을 이용해 용액 공정으로 박막을 형성하여 페로브스카이트의 층간 수소결합과 강한 공유결합 및 이온결합을 통해 p-type 전계효과 트랜지스터를 연구하여 10^4 on/off current ratio, $0.62 \text{ cm}^2/Vs$ 의 정공 이동도의 특성을 나타냈으며 채널층 영역의 별도 패터닝 공정 없이 1 cm^2 의 대면적에서 16개의 디바이스를 제작했으며 저가 및 저온 공정 수행이 가능하다고 보고했다 [14]. Mitzi 그룹은 페닐에틸암모늄 기반의 유사한 ($C_6H_4C_2H_4NH_3$) $_2SnI_4$ 소재로 비슷한 스피ن 코팅법으로 3가지 구조적 변형을 추가하여 소재의 광학적, 전기적 특성에 영향을 주려고 개발했으며 $2.6 \text{ cm}^2/Vs$ 의 정공 이동도 특성을 갖는 전계효과 트랜지스터에 대해 보고하였다 [15]. 두 그룹 모두 (PEA) $_2SnI_4$ 계열의 유사한 소재를 사용하고 있으나 Mitzi 그룹에서 언급한 전하의 이동 특성의 차이는 단순히 전자 구조가 변화하는 것뿐만 아니라 유기 양이온을 치환함으로써 발생하는 필름의 형태 변화에도 기인할 수 있다.

페로브스카이트 기반의 유기 발광 다이오드(organic light emitting diode, OLED) [16–20]는 높은 색 순도와 효율성을 보여주었으며 30 nm 미만의 얇고 투명한 나노 입자 발광체를 사용해 광 추출 효율을 극대화했으며 동일 휘도 기준의 소자의 구동 수명시간을 5,596시간으로 약 3,108배 향상된 것을 발표하였다 [21]. 앞서 언급한 전계효과 트랜지스터 및 메모리 소자에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는데 페로브스카이트의 이온 및 전자 특성을 바탕으로 새로운 기능성을 제공하며 차세대 전자 소재 개발에 기여하고 있으며 이들 연구는 물질이 가진 독특한 물리적, 화학적 특성이 더 많은 응용 분야로의 확장을 가능하게

할 것으로 기대하고 있는데 2015년 Wake Forest University와 Utah 대학의 연구그룹은 할라이드 유무기 하이브리드 페로브스카이트 전계효과 트랜지스터를 제작하여 $1 \text{ cm}^2/\text{vs}$ 의 전자 및 정공 수송의 이동도 특성을 실온에서 측정하는 데 성공했으며 유연 플라스틱 기판에 제작했을 뿐만 아니라 inkjet printing, spray deposition과 같이 대면적 증착이 가능함을 확인하였으나 여전히 수명이 짧으며 작동에 따른 성능 저하는 아직 개선해야 할 사항이다 (그림 3) [22].

$\text{Pb}(\text{Ac})_2$ 전구체를 사용하여 더 향상된 소자 특성을 보인 것과 함께 표면 거칠기와 grain 크기를 제어하여 surface morphology가 향상하여 좀 더 개선된 전하 이동도에 대해 보고하였다 (그림 4) [23,24]. 균일한 표면, 표면에 존재하는 결함의 효율적인 passivation 법 제시를 통한 상온에서의 전자 및 정공 이동도 성능으로 안정적인 구동이 가능한 것을 보고하였다 [25,26].

그림 5는 페로브스카이트 박막을 이용하여 thin film transistor (TFT) 소자의 성능을 연구한 논문으로 지금까지 보고된 field effect hole mobility가 가장 높은 결과이다. 이 논문에서는 Sn 기반 페로브스카이트 소재를 이용하여 P 채널 박막 TFT를 제작하였고, n 채널 소재와의 통합을 통하여 상보적 금속 산화물 반도체(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)를 발표했는데, 세슘, 포름아미다늄 및 페닐에틸암모늄을 결합한 새로운 형태의 삼중 A 양이온 엔지니어링을 통해 채널층의 결함을 최소화함으로써 전하 캐리어의 효율적인 전송과 고성능 트랜지스터를 가능하게 했으며, 이때 $70 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이상의 높은 홀 이동도를 나타냈다. 이는 상용 저온 폴리실리콘 트랜지스터(low temperature polysilicon, LTPS)와 유사한 수준이며 100°C 이하의 온도에서 용액 처리법을 사용함으로써 저온 공정의 가능성을 보여주었다 [27].

Table 1. 4-types field-effect transistors with perovskite semiconducting materials, merit, and drawback [12].

Structure type	Merit	Drawback
<p>Bottom Gate/Bottom Contact (BGBC)</p>	<p>Simple process, cost-effectiveness. The contact between the substrate and S/D electrode and the contact resistance were lower.</p>	<p>Possibility of damage in gate insulator. Difficulty in the shortness of channel length.</p>
<p>Bottom Gate/Top Contact (BGTC)</p>	<p>Easy to fabricate the S/D electrode. Compatible with a wide range of channel materials.</p>	<p>Relatively high contact resistance. Complex patterning of S/D electrodes.</p>
<p>Top Gate/Bottom Contact (TGBC)</p>	<p>Because it is easy to adjust the electrical characteristics, the gate electrodes are protected for durability.</p>	<p>It is difficult to make an S/D contact, and it may have a high contact resistance. The manufacturing process is complex and expensive.</p>
<p>Top Gate/Top Contact (TGTC)</p>	<p>The S/D and gate electrodes were on the same side for easy processing. Excellent electrical performance.</p>	<p>The gate insulation layer is difficult to fabricate and can cause high contact resistance.</p>

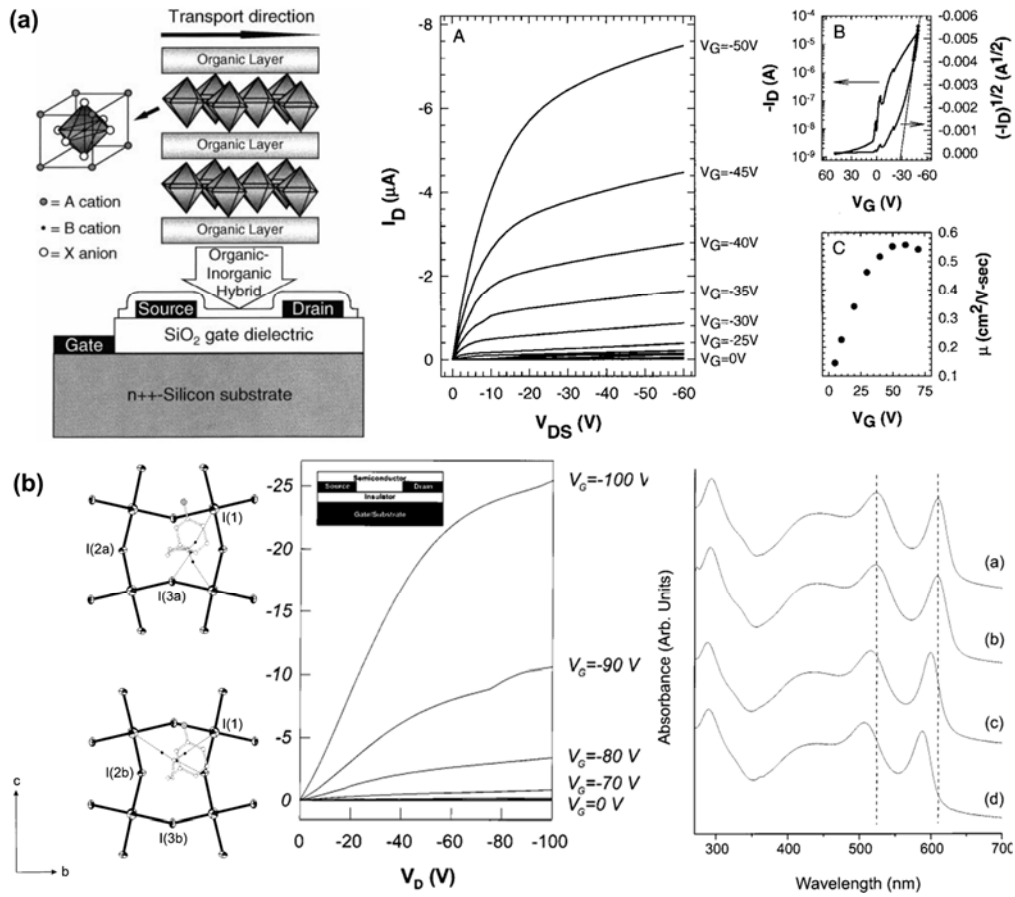


Fig. 2. (a) Organic-inorganic hybrid perovskite thin-film FET by (a) Kagan and (b) Mitzi groups [14,15].

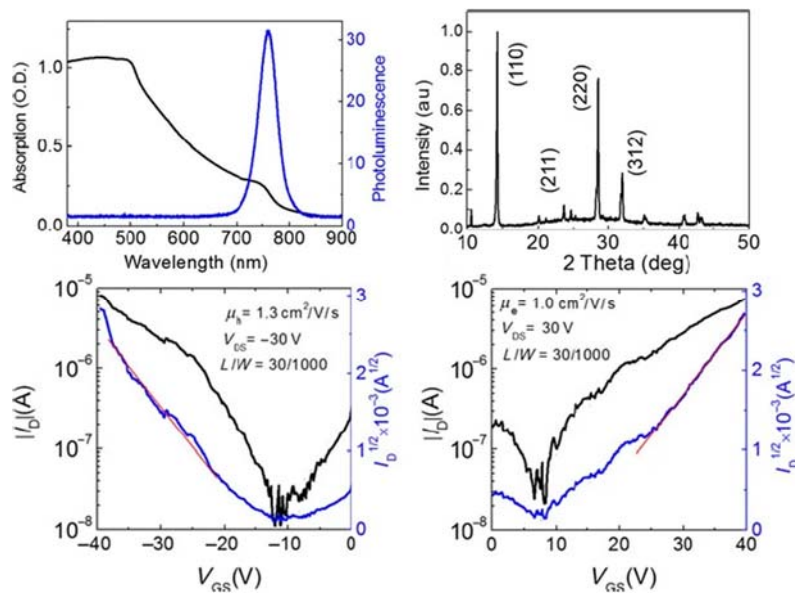


Fig. 3. The results of CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x hybrid halide perovskite FET at room-temperature [22].

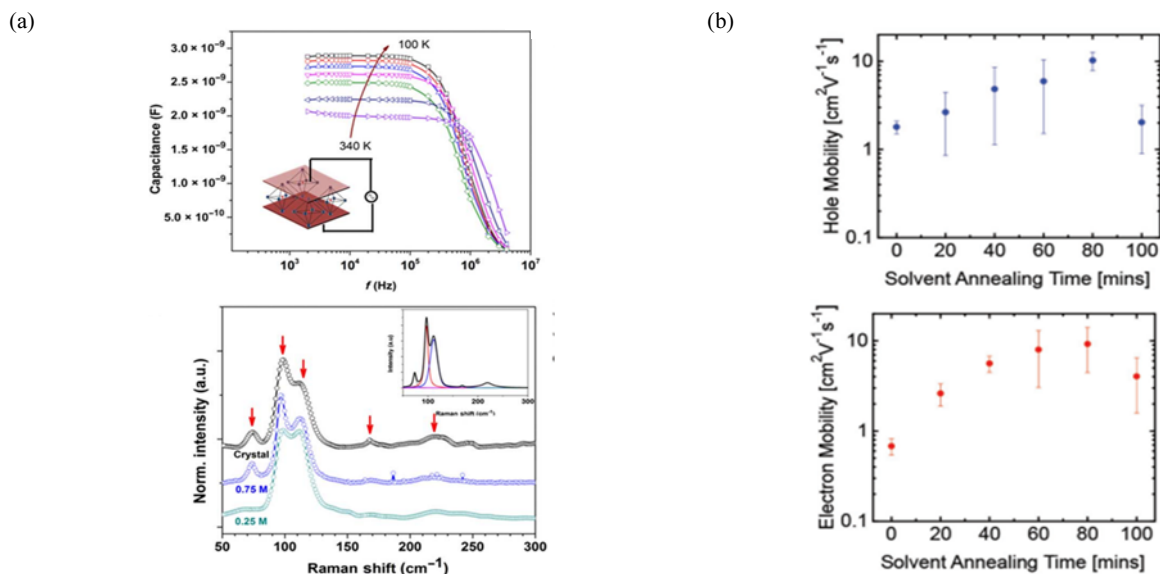


Fig. 4. (a) Capacitance-voltage characteristics of MAPbI₃ thin films with Au/Perovskite/Au sandwich structure and Raman spectra of perovskite materials with reference sample (crystal) and (b) Average charge carrier mobilities as a function of solvent annealing time with hole and electron mobility for FET devices of perovskite (CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x) [23,24].

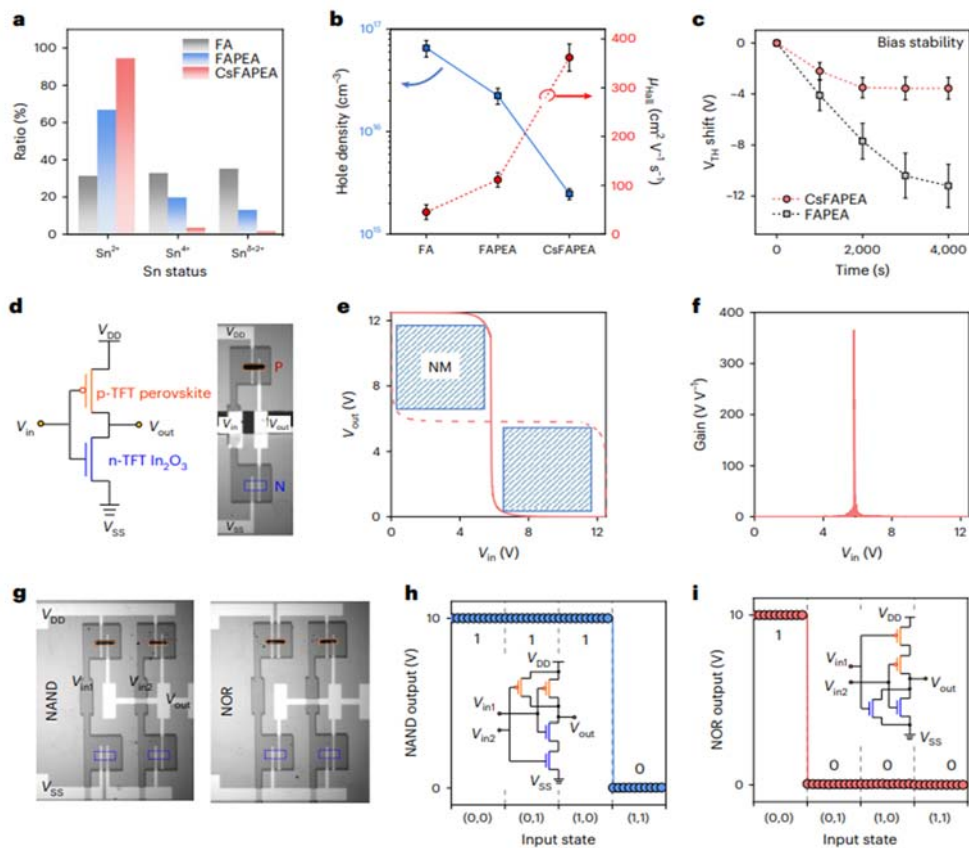


Fig. 5. Electrical characteristics (hole density and hole mobility) as a function of Sn²⁺, Sn⁴⁺, and Sn^{6-<2+} in FA, FAPEA, and CsFAPEA, V_{th} shift under the bias stability for 4,000 sec. with FAPEA, and CsFAPEA, p-TFT perovskite and n-TFT In₂O₃ complementary metal oxide semiconductor (CMOS) for NAND and NOR logic gates and output characteristics [27].

4. 기술적 도전과 해결 방안 그리고 미래 전망에 따른 발전 방향

할라이드 페로브스카이트 소재는 우수한 광전자 특성에 비해 환경 요인으로 인해 상업적 응용에 제한을 받을 수 있는데 특히 수분, 산소 및 온도 변화에 대해 반응에 민감하며 UV 노출될 경우 페로브스카이트의 소재 분해를 가속화하여 장기적 안정성 확보를 어렵게 하는 요인이다 [28-32]. 이러한 문제를 해결하려면 나노 기술을 활용한 고분자 코팅과 이중 층 코팅 기술을 개발해야 페로브스카이트의 층을 외부로부터 보호하고 수명을 연장시키는 등의 환경적 영향을 최소화하는 데 기여할 수 있다 [33-36]. 아울러 구조적 안정성인데 이는 새로운 합성 방법과 후처리 공정 도입으로 결정 구조를 강화하고 이온 이동을 제한하는 것이다 [37]. 마지막으로 계면 제어에 관한 것으로 소자의 전하 수송층과 계면에서의 안정성을 개선하기 위해 새로운 재료를 도입하고 계면의 화학적 결합을 강화하는 기술을 개발하는 것이다 [38]. 현재 페로브스카이트 소자는 높은 성능을 보이고 있지만 그럼에도 불구하고 전하 재결합과 비효율적인 전하 수송으로 인해 최적의 성능을 발휘하지 못하는데 재료를 설계하는 과정에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 소재가 가진 전기 및 광학적 특성을 예측하여 최적의 재료 조합과 구조를 설계하는 것이 중요하며 전하 재결합을 줄이기 위해 고순도의 결정성, 도핑 기술 및 결정 구조 조절을 통해 결정성이 향상된 페로브스카이트의 소재 개발을 해야 하며 다층 구조 및 설계의 최적화를 통해 소자의 성능을 높이는 등의 우리가 사용하게 될 소자 구조를 최적화하는 것이 중요하다 [39-44].

앞으로 다가올 4차 산업혁명 시대에서 페로브스카이트 소재는 다양한 응용으로 결국 고성능, 저비용, 안정성 확보의 목표를 동시에 달성해야 하는 도전 과제를 가지고 있는데 이러한 점에서 실험실 규모를 벗어나 산업 규모로의 대전환, 대량 생산이 가능한 합성 및 증착 기술을 개발해야 하고 이를 통해 생산 비용 절감 효과와 생산 효율을 극대화할 수 있어야 한다. 아울러 제조 공정의 자동화를 실현하여 일관된 품질과 높은 생산성을 확보해야 하며 폐기물 최소화를 포함한 친환경적 생산 공정을 개발해야 하며 원가 절감 분석을 통해 새로운 소재와 방법을 지속적으로 연구해야 한다.

할라이드 페로브스카이트 소재는 최근 몇 년간 광전자 및 전자 소자 분야에서 두드러진 발전을 이뤄 왔다. 소재가 가진 독특한 광학적, 전기적 특성 덕분에 향후에는 다양한 응용 분야로 확장이 기대되는데 이는 친환경적 합성 방법을 통해 유해 화학 물질 사용을 최소화하는 것이며 수명이 다 된 소자를 재활용이 가능하도록 분해 및 재조합이 용이한 소재 개발이 필요하며 극한 환경에서 견딜 수 있고 두 가지 이상의 기능을 갖춘 하이브리드 소자 개발도 염두에 두어야 한다. 이처럼 상업적 활용이 늘어날 것을 예상하여 대량 생산 체제를 갖춘 설비 개발과 더불어 생산비 절감을 통한 원가 경쟁력을 확보할 수 있도록 대비하는 것은 물론이며 조명, 디스플레이 외에도 센서를 비롯해 의료 분야와 같이 새로운 시장을 개척하는 것이 무엇보다 중요하다. 그 외에도 관련 전문 인력 양성과 함께 교육 프로그램 개발이 필요하며 안전 및 환경규제와 같은 정책 수립과 산업 표준 개발도 필요하다. 이는 기술의 안전한 적용과 시장의 건전한 발전을 도모하는 데 기여할 것으로 본다.

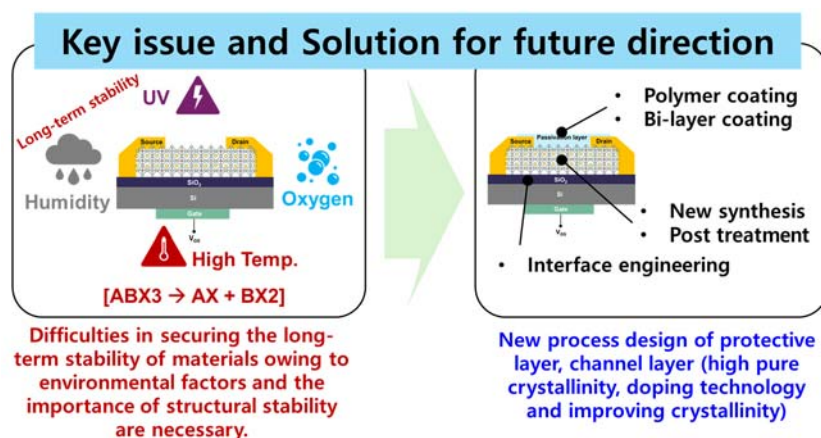


Fig. 6. Technical instructions for achieving high performance and long-term stability of FET devices based on perovskite materials [28-44].

5. 결론

본 논문에서 할라이드 페로브스카이트 소재의 물리화학적 특성, 반도체 소자에의 응용, 그리고 이 소재가 직면한 기술적 도전과 이에 대한 해결 방안을 심도 깊게 조사하였다. 이 소재는 독특한 광학적 및 전기적 특성으로 인해 고성능의 광전자 및 전자 소자를 가능하게 하며, 특히 태양전지, LED, 센서 등 다양한 기술적 응용 분야에서 가능성이 높게 평가되고 있다. 우리가 살펴본 바와 같이, 페로브스카이트 소재는 여러 가지 기술적 도전에 직면해 있다. 특히, 환경적 안정성과 장기적 성능 유지가 무엇보다 중요하며 이를 해결하기 위해 나노 기술을 활용한 고분자 코팅, 이중 층 코팅 기술, 그리고 소재의 구조적 안정성을 강화하는 다양한 접근 방법이 연구되고 있다. 이러한 기술적 개선은 소재의 상용화를 앞당기는 데 크게 기여할 것이다. 더욱이, 페로브스카이트 소재의 전계효과 트랜지스터 및 다른 광전자 소자들에 대한 연구는 계속해서 발전하고 있으며, 이는 차세대 전자 소자 개발에 중요한 기여를 하고 있다. 앞으로는 이 소재의 전기적, 광학적 특성을 더욱 극대화하고, 다기능성을 가진 새로운 하이브리드 소자 개발이 필수적일 것이며 이러한 맥락에서 본 논문은 페로브스카이트 소재와 관련된 현재의 연구 동향을 종합하고, 미래 연구 방향과 시장 전망을 제시하고자 한다. 특히, 새로운 응용 분야로의 확장과 상업적 응용 가능성을 강조하면서, 지속 가능한 기술 개발을 위한 전략적 접근이 논의되었다.

ORCID

Hyeong Gi Park
Jungyup Yang

<https://orcid.org/0000-0002-9590-1623>
<https://orcid.org/0000-0003-0425-7447>

감사의 글

이 성과는 2023년 중부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 국가반도체연구실 지원을 받아 수행된 연구입니다 (RS-2023-00281286).

REFERENCES

- [1] L. M. Herz, *ACS Energy Lett.*, **2**, 1539 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00276>
- [2] J. Shamsi, A. S. Urban, M. Imran, L. De Trizio, and L. Manna, *Chem. Rev.*, **119**, 3296 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00644>
- [3] C. Otero-Martínez, N. Fiuza-Maneiro, and L. Polavarapu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 34291 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.2c01822>
- [4] Y. Zhou and Y. Zhao, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 1495 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1039/C8EE03559H>
- [5] Y. Zhou, J. Chen, O. M. Bakr, and O. F. Mohammed, *ACS Energy Lett.*, **6**, 739 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c02430>
- [6] Y. Wu, J. Feng, Z. Yang, Y. Liu, and S. Liu, *Adv. Sci.*, **10**, 2205536 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202205536>
- [7] H. Dong, C. Ran, W. Gao, M. Li, Y. Xia, and W. Huang, *eLight*, **3**, 3 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1186/s43593-022-00033-z>
- [8] Y. Mu, Z. He, K. Wang, X. Pi, and S. Zhou, *iScience*, **25**, 105371 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105371>
- [9] C. He and X. Liu, *Light: Sci. Appl.*, **12**, 15 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41377-022-01010-4>
- [10] S. T. Ha, R. Su, J. Xing, Q. Zhang, and Q. Xiong, *Chem. Sci.*, **8**, 2522 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1039/C6SC04474C>
- [11] D. Duan, C. Ge, M. Z. Rahaman, C. H. Lin, Y. Shi, H. Lin, H. Hu, and T. Wu, *NPG Asia Mater.*, **15**, 8 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41427-023-00465-0>
- [12] W. Yang, L. Dou, H. Zhu, and Y. Y. Noh, *Small Struct.*, **5**, 2300393 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/sstr.202300393>
- [13] H. G. Park, D. Y. Kim, and J. Yi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 133 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.2.2>
- [14] C. R. Kagan, D. B. Mitzi, and C. D. Dimitrakopoulos, *Science*, **286**, 945 (1999).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.286.5441.945>
- [15] D. B. Mitzi, C. D. Dimitrakopoulos, and L. L. Kosbar, *Chem. Mater.*, **13**, 3728 (2001).
doi: <https://doi.org/10.1021/cm010105g>
- [16] T. Matsushima, F. Bencheikh, T. Komino, M. R. Leyden, A.S.D. Sandanayaka, C. Qin, and C. Adachi, *Nature*, **527**, 502 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1435-5>
- [17] S. Chu, W. Chen, Z. Fang, X. Xiao, Y. Liu, J. Chen, J. Huang, and Z. Xiao, *Nat. Commun.*, **12**, 147 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20433-4>
- [18] K. Ji, M. Anaya, A. Abfalterer, and S. D. Stranks, *Adv. Opt. Mater.*, **9**, 2002128 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/adom.202002128>
- [19] L. Zhang, C. Sun, T. He, Y. Jiang, J. Wei, Y. Huang, and M. Yuan, *Light: Sci. Appl.*, **10**, 61 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00501-0>
- [20] H. Kwon, S. Park, S. Kang, S. Park, Y. J. Pu, and J. Park, *Appl.*

- Surf. Sci.*, **588**, 152875 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152875>
- [21] H. D. Lee, S. J. Woo, S. Kim, J. Kim, H. Zhou, S. J. Han, K. Y. Jang, D. H. Kim, J. Park, S. Yoo, and T. W. Lee, *Nat. Nanotechnol.*, **19**, 624 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41565-023-01581-2>
- [22] Y. Mei, C. Zhang, Z. V. Vardeny, and O. D. Jurchescu, *MRS Commun.*, **5**, 297 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1557/mrc.2015.21>
- [23] S. P. Senanayak, B. Yang, T. H. Thomas, N. Giesbrecht, W. Huang, E. Gann, B. Nair, K. Goedel, S. Guha, X. Moya, C. R. McNeill, P. Docampo, A. Sadhanala, R. H. Friend, and H. Sirringhaus, *Sci. Adv.*, **3**, e1601935 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601935>
- [24] A. M. Zeidell, C. Tyznik, L. Jennings, C. Zhang, H. Lee, M. Guthold, Z. V. Vardeny, and O. D. Jurchescu, *Adv. Electron. Mater.*, **4**, 1800316 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.201800316>
- [25] S. P. Senanayak, M. Abdi-Jalebi, V. S. Kamboj, R. Carey, R. Shivanna, T. Tian, G. Schweicher, J. Wang, N. Giesbrecht, D. Di Nuzzo, H. E. Beere, P. Docampo, D. A. Ritchie, D. Fairen-Jumenez, R. H. Friend, and H. Sirringhaus, *Sci. Adv.*, **6**, eaaz4948 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz4948>
- [26] X. J. She, C. Chen, G. Divitini, B. Zhao, Y. Li, J. Wang, J. F. Orri, L. Cui, W. Xu, J. Peng, S. Wang, A. Sadhanala, and H. Sirringhaus, *Nat. Electron.*, **3**, 694 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00486-5>
- [27] H. Zhu, W. Yang, Y. Reo, G. Zheng, S. Bai, A. Liu, and Y. Y. Noh, *Nat. Electron.*, **6**, 650 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-023-01019-6>
- [28] Q. Chen, N. De Marco, Y. Yang, T. B. Song, C. C. Chen, H. Zhao, Z. Hong, H. Zhou, and Y. Yang, *Nano Today*, **10**, 355 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.009>
- [29] J. S. Manser, J. A. Christians, and P. V. Kamat, *Chem. Rev.*, **116**, 12956 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00136>
- [30] L. Chu, W. Ahmad, W. Liu, J. Yang, R. Zhang, Y. Sun, J. Yang, and X. Li, *Nano-Micro Lett.*, **11**, 16 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0244-6>
- [31] C. C. Boyd, R. Cheacharoen, T. Leijtens, and M. D. McGehee, *Chem. Rev.*, **119**, 3418 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00336>
- [32] Y. Li, W. Zhou, Y. Li, W. Huang, Z. Zhang, G. Chen, H. Wang, G. H. Wu, N. Rolston, R. Vila, W. Chiu, and Y. Cui, *Joule*, **3**, 2854 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.016>
- [33] T. A. Chowdhury, M.A.B. Zafar, M.S.U. Islam, M. Shahinuz-zaman, M. A. Islam, and M. U. Khandaker, *RSC Adv.*, **13**, 1787 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1039/D2RA05903G>
- [34] F. Corsini and G. Griffini, *J. Phys. Energy*, **2**, 031002 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab8774>
- [35] G. Y. Kim, K. Kim, H. J. Kim, H. S. Jung, I. Jeon, and J. W. Lee, *EcoMat*, **5**, e12319 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/eom2.12319>
- [36] A.S.R. Bati, Y. L. Zhong, P. L. Burn, M. K. Nazeeruddin, P. E. Shaw, and M. Batmunkh, *Commun. Mater.*, **4**, 2 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s43246-022-00325-4>
- [37] M. Ding, X. Cai, and H. L. Jiang, *Chem. Sci.*, **10**, 10209 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1039/C9SC03916C>
- [38] W. Shen, Y. Dong, F. Huang, Y. B. Cheng, and J. Zhong, *Mater. Rep.: Energy*, **1**, 100060 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matre.2021.100060>
- [39] Z. Z. Li, C. Guo, W. Lv, P. Huang, and Y. Zhang, *J. Phys. Chem. Lett.*, **15**, 3835 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.4c00320>
- [40] L. Protesescu, S. Yakunin, M. I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C. H. Hendon, R. X. Yang, A. Walsh, and M. V. Kovalenko, *Nano Lett.*, **15**, 3692 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl5048779>
- [41] S. Mourdikoudis, R. M. Pallares, and N.T.K. Thanh, *Nanoscale*, **10**, 12871 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1039/C8NR02278J>
- [42] M. Jošt, L. Kegelmann, L. Korte, and S. Albrecht, *Adv. Energy Mater.*, **10**, 1904102 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201904102>
- [43] Y. T. Huang, S. R. Kavanagh, D. O. Scanlon, A. Walsh, and R.L.Z. Hoyer, *Nanotechnology*, **32**, 132004 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abcf6d>
- [44] M. H. Mohammadi, M. Eskandari, and D. Fathi, *Sci. Rep.*, **13**, 15905 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43137-3>