引用格式：黄晓锋，祁楷航，杨晨希，等. 钙钛矿太阳能电池制备过程中的多尺度调控机制及其对器件性能的影响[J]. 中国材料进展，2026，45(10)：982-993.

HUANG X F, QI K H, YANG C X, *et al*. Multiscale Control Mechanisms in Perovskite Solar Cells Fabrication and Their Impact on Device Performance[J]. Materials China, 2026, 45(10): 982-993.

特约专栏

钙钛矿太阳能电池制备过程中的多尺度调控机制及其对器件性能的影响

黄晓锋[1]，祁楷航[2]，杨晨希[2]，王奕乔[2]

（1. 香港城市大学化学学院，香港 999077）

（2. 西北工业大学材料学院，陕西 西安 710072）

摘 要：钙钛矿太阳能电池的光电转换效率与长期稳定性高度依赖于制备过程中多尺度因素的协同调控。系统综述了从钙钛矿吸光层及各功能层前驱体体系到器件整体结构等关键环节对器件性能的影响机制，重点分析了原材料分子设计、成膜动力学、薄膜微观结构调控、界面与电荷传输层工程、大面积组件制备与系统集成之间的内在关联。研究表明，前驱体体系通过调控结晶路径、相演化过程与缺陷分布，为高质量钙钛矿薄膜的形成奠定基础；成膜过程中的反溶剂工程、添加剂种类与退火条件共同影响薄膜结晶过程，包括晶粒尺寸、晶粒取向、覆盖均匀性及残余应力，进而影响载流子输运、陷阱诱导复合和器件迟滞行为。界面钝化与传输层能级匹配能够有效降低非辐射复合损失，改善载流子选择性提取，进而提升开路电压、短路电流密度与填充因子。与此同时，n-i-p 与 p-i-n 器件结构在制备工艺兼容性、界面稳定性及尺寸放大方面表现出不同优势与挑战；在组件化与系统集成过程中，薄膜均匀性、串联互连损耗、缺陷累积、环境稳定性及封装可靠性共同决定了钙钛矿光伏的产业化转化潜力。进一步归纳了从小面积器件向大面积模块过渡时所面临的关键瓶颈，包括界面复合、离子迁移、相分离、模块互连损耗及封装可靠性等。未来研究应聚焦于材料-成膜-界面-器件-组件的多尺度协同优化，发展原位/工况表征测试技术与机器学习辅助的工艺筛选方法，并构建统一、可比、可追溯的稳定性评价体系。

关键词：钙钛矿太阳能电池；制备工艺；薄膜结晶；界面工程；大面积组件；稳定性

中图分类号：TM914.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-3962(2026)10-0982-12

Multiscale Control Mechanisms in Perovskite Solar Cells Fabrication and Their Impact on Device Performance

HUANG Xiaofeng[1], QI Kaihang[2], YANG Chenxi[2], WANG Yiqiao[2]

(1. Department of Chemistry, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

(2. Shool of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The power conversion efficiency and long-term stability of perovskite solar cells are highly dependent on the synergistic regulation of multiscale factors during the fabrication process. This review systematically summarizes the device performance influence mechanisms by several key factors, ranging from precursor systems for the perovskite absorber and functional layers to overall device architectures. Particular emphasis is placed on the intrinsic correlations among molecular design of raw materials, film-formation dynamics, regulation of thin-film microstructure, interface and charge-transport-layer engineering, large-area module fabrication and system integration. Current studies indicate that precursor systems establish the foundation for high-quality perovskite films by regulating crystallization pathways, phase evolution and defect distributions. During film formation, antisolvent engineering, additive types and annealing conditions collectively regulate film crystallization processes, including grain size, crystallographic orientation, film coverage uniformity and residual stress, thereby affecting charge-carrier transport, trap-induced recombination and device hysteresis. Interface passi-

收稿日期：2026-05-19 **修回日期**：2026-08-18

第一作者：黄晓锋，男，1993 年生，助理研究员，

Email：xhuan7@cityu.edu.hk

DOI：10.7502/j.issn.1674-3962.202605017

vation and energy-level alignment of transport layers can effectively suppress non-radiative recombination losses and improve the selective extraction of charge carriers, leading to enhanced open-circuit voltage, short-circuit current density and fill factor. Meanwhile, n-i-p and p-i-n device architectures exhibit distinct advantages and challenges in terms of fabrication compatibility, interfacial stability and large-area scalability. During module fabrication and system integration, film uniformity, series interconnection losses, defect accumulation, environmental stability and encapsulation reliability jointly determine the industrialization potential of perovskite solar cells. This review further summarizes the major bottlenecks encountered in the transition from small-area devices to large-area modules, including interfacial recombination, ion migration, phase segregation, module interconnection losses and encapsulation reliability. Future research should focus on following directions: multiscale synergistic optimization across materials, film formation, interfaces, devices and modules; the development of *in-situ* and operando characterization/testing techniques; machine-learning-assisted process screening; and the establishment of unified, comparable and traceable stability evaluation protocols.

Key words: perovskite solar cells; fabrication process; thin-film crystallization; interface engineering; large-area modules; stability

1　前　言

钙钛矿太阳能电池凭借其高效率、可溶液加工及带隙可调等优势，在过去 10 余年间迅速崛起为新一代光伏技术的核心方向之一。截至 2026 年初，单结小面积器件（<0.1 cm^2）的认证效率已超过 27.9%[1]，1 cm^2 器件认证效率达 25.6%[2]。全钙钛矿叠层器件认证效率达到 30.6%[3]，钙钛矿/硅叠层器件认证效率达 34.58%[4]，展现出远超传统薄膜电池的潜力。然而，高效率主要集中于实验室小面积器件（<0.1 cm^2），面向产业化的大面积制备、长期运行稳定性与工艺可重复性仍面临严峻挑战。制约器件性能提升的关键不仅在于材料本征性质，更在于制备过程中从原材料到器件集成的多环节、多尺度因素之间的耦合作用。

目前已有大量综述分别聚焦于缺陷工程、界面层优化或成膜工艺等单一维度，但针对“原材料-加工工艺-微观结构-异质界面-器件系统”全链条的系统性梳理仍然不足。事实上，钙钛矿薄膜的结晶行为、缺陷分布以及载流子动力学并非孤立存在，而是从前驱体溶液状态、成膜过程中的动力学演化，到界面电荷选择性传输与大面积组件中的均匀性与系统损耗，呈现出层层递进、相互耦合的复杂关联。因此，只有立足于制备全过程，厘清各关键因素的作用机制及内在关联，才能为钙钛矿器件的高效率、高稳定与高可重复制备提供科学依据。

本综述围绕钙钛矿太阳能电池制备过程中影响器件性能与稳定性的核心因素，按照“材料基础-工艺调控-结构演变-界面优化-系统集成”的逻辑主线展开讨论。第 2 章聚焦原材料与前驱体体系，重点分析分子设计、形貌控制与化学稳定性对结晶起始过程与缺陷形成的影响；第 3 章围绕成膜动力学与工艺参数，探讨反溶剂处理、退火条件及涂布方式等因素对成核行为与晶粒生长过程的调控机制；第 4 章进一步归纳薄膜微观结构特征，包括晶粒尺寸、取向与缺陷密度，与载流子输运及复合行为之间的内在关联；第 5 章从电子/空穴传输层与界面钝化策略出发，阐明界面复合损失机制及电荷选择性传输的优化路径；第 6 章进一步拓展至器件结构与系统层面，对比 n-i-p 与 p-i-n 结构在界面稳定性与迟滞行为方面的影响，分析大面积制备中均匀性、系统损耗与封装协同对器件工程化应用的关键作用。最后，总结当前钙钛矿太阳能电池领域的研究进展与关键瓶颈，并对未来发展方向进行展望（图 1）。

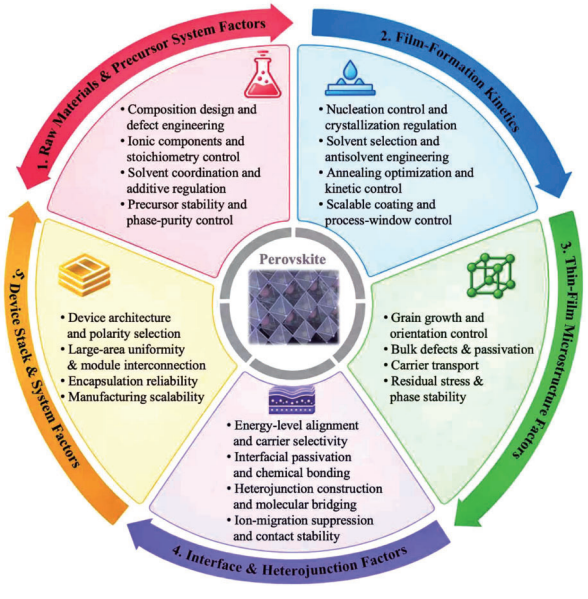


图 1　文章结构介绍

Fig. 1　Introduction to the article structure

2　原材料与前驱体体系因素

原材料与前驱体体系是钙钛矿太阳能电池制备过程中的核心基础，其组成、配位状态及溶液化学环境直接决定晶体成核行为与结晶演化路径，从而影响薄膜形貌、缺陷分布以及最终器件性能。近年来的研究表明，通过优化前驱体组成、调控分子间相互作用，可以从源头上

调节结晶动力学与薄膜形成过程，有效提升晶体质量并降低缺陷密度，从而为器件效率与稳定性的同步提升提供重要支撑。

在两步法制备体系中，PbI_2 前驱体薄膜的形貌对后续钙钛矿转化过程具有显著影响。若 PbI_2 薄膜致密且孔隙分布不均，会限制有机阳离子扩散并导致转化不完全，并在最终体相薄膜中形成非均匀结构与大量缺陷。研究表明，通过引入路易斯酸碱相互作用调控 PbI_2 结晶过程，可以构建具有均一多孔结构的前驱体薄膜，从而促进有机组分在转化过程中的充分扩散与反应，最终获得更加致密、均匀的钙钛矿薄膜，显著提升平面结构器件的光伏性能[5]。该策略表明，从原材料层面对前驱体形貌进行设计，是优化薄膜质量的重要方向(图 2)。

从分子层面出发的缺陷调控策略同样显示出显著效果。含有双官能团的分子能够同时与晶格中不同缺陷位点发生协同作用，形成所谓的双相互作用结构。这种相互作用可以有效钝化未配位金属离子与卤素空位，从而降低非辐射复合损失并改善薄膜形貌。在理论计算与实验验证的结合下，采用双羧基的功能分子能够调控晶体生长，实现良好的结构稳定性，并且在空气条件下实现高效率器件制备(图 3)[6]。这一策略体现了分子设计与第一性原理计算结合在原材料优化中的重要价值。

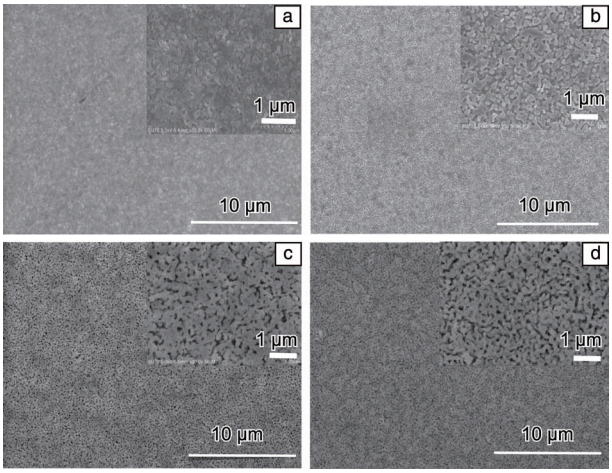


图 2 采用气相处理法形成的多孔 PbI_2 薄膜的平面 SEM 照片[5]：(a)0 min，(b)5 min，(c)10 min，(d)30 min

Fig. 2 SEM images of porous PbI_2 films formed by vapor-phase treatment for 0 min (a), 5 min (b), 10 min (c) and 30 min (d)[5]

缺陷工程作为材料优化的重要方向，也进一步强化了原材料体系调控的重要性。系统性综述指出，钙钛矿材料中的空位缺陷、间隙缺陷及反位缺陷会引发载流子复合和离子迁移，加速器件性能衰退。因此，通过前驱体调控与添加剂策略降低体相及晶界缺陷，是提升器件开路电压与稳定性的关键途径[7]。原材料体系不仅影响

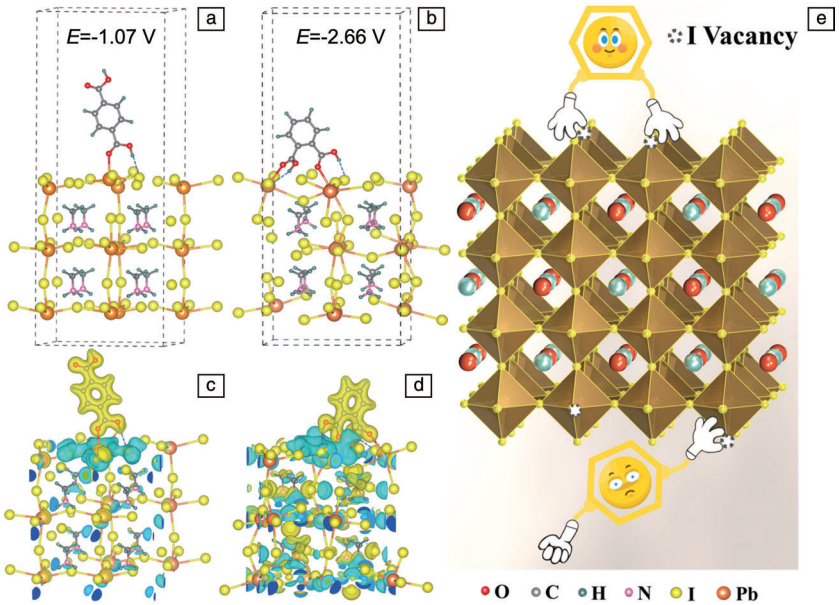


图 3 PTA-$MAPbI_3$(a)和 PHA-$MAPbI_3$(b)双官能团的分子诱导双相互作用的示意图；$MAPbI_3$ 与 PTA(c)及 PHA(d)之间的电荷密度差分图，电子增益/损失大于 0.08 e·Å^{-3} 的部分用黄色/蓝色标出，氢键以蓝色虚线表示；PTA/PHA 作用于钙钛矿缺陷位点的模拟示意图(e)[6]

Fig. 3 Schematic illustrations of dual interactions induced by bifunctional molecules in PTA-$MAPbI_3$(a) and PHA-$MAPbI_3$(b); charge density difference maps between $MAPbI_3$ and PTA (c) and PHA (d), regions with electron accumulation/depletion greater than 0.08 e·Å^{-3} are highlighted in yellow/blue, respectively, and hydrogen bonds are indicated by blue dashed lines; simulated schematic illustration of the interactions of PTA/PHA with defect sites in the perovskite (e)[6]

初始结晶质量，还在长期运行过程中决定材料的抗衰变能力。

对于窄带隙体系而言，前驱体化学稳定性同样至关重要。锡铅(Sn-Pb)混合钙钛矿结构虽可拓展光吸收范围，但 Sn^{2+}容易氧化为 Sn^{4+}，形成 Sn 空位并降低载流子扩散长度。通过在前驱体墨水中引入化学调控机制，抑制 Sn^{2+}氧化反应，可以有效减少缺陷生成，提高载流子扩散长度，并实现高效率叠层结构器件制备[8]。该类研究表明，前驱体化学反应路径的控制是高性能窄带隙钙钛矿材料设计的关键。

面向产业化的大面积制备需求，前驱体体系的绿色化与规模化合成在 2024～2025 年取得重要突破。Zhu 等[9]发展了水相合成法，以低成本低纯度原料实现了 $FAPbI_3$ 晶体公斤级制备，晶体纯度达 99.994%，成本较商用原料降低 2 个数量级。同时，绿色溶剂体系(二甲基亚砜/乙腈/乙醇混合溶剂)的成功开发，使刮涂法制备的宽带隙钙钛矿电池光电转换效率达到 19.6%(1.78 eV)和 21.5%(1.68 eV)，为叠层组件的大面积制备提供了环境友好的工艺基础[10]。

综上所述，原材料与前驱体的调控不仅包括组分比例与溶液浓度的优化，还涉及前驱体形貌构建、分子缺陷钝化及化学稳定性控制等多层面调控策略。在结晶初始阶段优化材料结构，可以有效优化薄膜结晶质量、降低缺陷密度并改善微观结构均匀性，从而提升器件效率与运行稳定性。因此，原材料与前驱体体系不仅是钙钛矿薄膜形成的基础，更是连接分子设计与器件宏观性能的核心环节。

3　成膜动力学与工艺参数影响

在材料体系确定后，成膜动力学与工艺参数成为决定钙钛矿薄膜质量和器件性能的核心因素。钙钛矿溶液成膜过程中涉及溶剂挥发、过饱和形成、晶体成核与晶粒生长等多个相互耦合的阶段，其结晶动力学路径对最终薄膜的晶粒尺寸、晶体取向以及缺陷分布等微观结构特征具有决定性影响。大量研究表明，通过优化旋涂程序、反溶剂工程、热处理路径以及可扩展加工方式，可以显著提升薄膜均匀性与器件光电转换效率。

首先，反溶剂工程被广泛认为是调控成核速率与晶粒尺寸的关键手段。在旋涂过程中适时滴加反溶剂能够迅速诱导过饱和状态，形成均匀成核结构，从而获得致密且大晶粒薄膜。若滴加时间过早会导致瞬时大量成核，形成小晶粒结构，过晚则可能造成结晶不完全或溶剂残留缺陷。研究指出，合理控制反溶剂时间窗口可显著改善钙钛矿薄膜质量从而提升组装器件的开路电压和填充因子[11]。同时，溶剂-反溶剂体系的匹配对中间相形成和结晶路径具有重要影响[12]。

退火条件对晶体重排与相稳定性影响显著。适当的退火温度有助于晶粒长大并降低缺陷密度，提高载流子寿命和填充因子。通常在 100～120 ℃范围内可获得较优结晶质量，过高温度可能引发相分解或结构应力积累。研究表明，通过优化热处理工艺可以改善晶体取向与结晶完整性，从而提升器件效率[13]。

在规模化加工方面，成膜工艺的可扩展性已成为钙钛矿太阳能电池走向产业化的关键议题。随着刮涂、槽式涂布和喷涂等技术的发展，研究重点逐渐转向溶剂挥发动力学与大面积结晶一致性的协同调控。研究指出，在小面积实验室条件下优化的旋涂工艺，在放大至大面积制备时往往难以维持相同的结晶行为与薄膜质量，因此需要重新设计溶剂体系、挥发速率及干燥路径，以确保晶粒尺寸、晶体取向及薄膜形貌在大面积范围内的均匀分布[14]。这表明成膜动力学不仅直接影响器件效率，同时也是决定规模化制造可行性与工艺稳定性的核心因素。

此外，低温加工技术的发展为构建柔性器件与碳基电极结构提供了新的可能。低温导电浆料的引入能够减少热应力对薄膜的损伤，同时维持良好的电荷提取效率。这类优化工艺在保持高效率的同时提高了器件热稳定性，为大面积和柔性结构应用奠定了基础[15]。

近年来的综合性分析还指出，成膜过程本质上是一个高度动态的非平衡结晶体系，器件效率提升依赖于对溶剂挥发、离子迁移与晶体重排过程的精确控制[16]。因此，在未来研究中，应将结晶动力学调控与工程化工艺放大结合，以实现高质量薄膜的可重复制备。

总体而言，成膜动力学与工艺参数通过调控成核速率、晶粒生长路径及薄膜致密程度，直接影响开路电压、短路电流密度与填充因子，是连接材料设计与器件性能的重要桥梁。

4　薄膜微观结构因素

前述原材料体系与成膜工艺参数的调控最终都会体现在薄膜微观结构层面，而微观结构则是连接制备条件与器件性能的关键中间变量。晶粒尺寸、晶体取向、膜厚分布、缺陷密度以及晶界状态等结构特征直接影响载流子输运路径与复合行为，从而决定开路电压、短路电流密度与填充因子。因此，对薄膜微观结构因素进行系统归纳，对于理解性能提升机制具有重要意义。

4.1　晶粒尺寸与晶界效应

晶粒尺寸被认为是影响钙钛矿器件性能的核心因素之一。大晶粒意味着晶界数量减少，可降低晶界处的载

流子复合概率。研究表明，通过优化结晶路径可获得毫米级晶粒结构，显著延长载流子扩散长度并提高光电转换效率[13]。同时，晶界往往是空位缺陷富集与离子迁移发生的集中区域，较多晶界不仅会增加非辐射复合中心，导致载流子复合损失加剧，还可能成为诱发局部结构退化与晶格坍塌的活性位点，从而加速器件性能衰减[17]。因此，通过控制成核密度与晶体生长速率获得大晶粒结构，是降低薄膜缺陷复合、提升器件开路电压与稳定性的有效途径。

然而，单纯追求晶粒尺寸增大并非唯一目标。部分研究指出，晶界钝化可在保持适中晶粒尺寸的同时显著降低缺陷密度，从而提升效率[18]。这说明晶粒质量与晶界状态同样重要。

4.2 晶体取向与择优生长

除了晶粒尺寸外，晶体取向对载流子输运方向具有重要影响。钙钛矿薄膜通常呈现多晶随机取向结构，不同晶面之间存在复杂的晶界与能级差异，容易导致载流子散射与非辐射复合损失。通过调控前驱体配位状态、成膜动力学及退火过程，可以有效诱导晶体沿特定晶面择优生长，从而构建具有高度取向性的薄膜结构。研究显示，(100)取向增强有助于降低晶界无序度与界面陷阱态密度，减少非辐射复合通道，并促进载流子的定向传输[19]。

晶体取向不仅影响单结器件中的电荷输运效率，还在叠层太阳能电池中发挥更加关键的作用。在钙钛矿/硅或全钙钛矿叠层结构中，取向工程能够优化上下子电池之间的界面匹配关系，降低界面能级失配与串联传输阻抗，从而提高跨界面电荷传输效率与整体能量转换性能[20]。此外，通过外延生长或界面诱导生长策略，可获得更高结晶完整性与取向一致性的多晶薄膜[21]。这类结构优化有助于改善薄膜内部的电场分布，增强垂直方向载流子输运能力，减少因横向扩散造成的复合损失。

4.3 膜厚与光吸收平衡

膜厚是影响钙钛矿太阳能电池光学行为与电荷输运特性的关键结构参数，其优化过程本质上涉及光吸收能力与载流子传输效率之间的平衡。较薄膜层可能导致光吸收不足，从而降低短路电流密度。与此同时，局部覆盖不完全的超薄膜还可能引入针孔与界面缺陷，进一步增加漏电流与非辐射复合损失；相反，当膜层过厚时，虽然光吸收能力得到增强，但载流子需要在更长距离内完成输运与收集，容易受到体相缺陷、晶界陷阱及离子迁移的影响，从而增加非辐射复合概率。研究指出，在合理厚度范围内，薄膜可在光吸收与电荷传输之间实现平衡，从而获得较高效率[22]。特别是在大面积器件中，过厚膜层还会加剧溶剂残留与结晶不均匀现象，影响薄膜稳定性与工艺重复性。因此，膜厚优化并非单纯追求更高的光吸收，而是需要结合材料光吸收系数、载流子扩散长度、界面传输效率及器件结构进行综合设计。

4.4 缺陷密度与载流子复合

缺陷密度是影响器件开路电压和稳定性的关键因素。体相缺陷与晶界缺陷会形成深能级陷阱，诱导非辐射复合并降低准费米能级分裂。系统分析表明，通过材料优化与表面钝化可显著降低缺陷态密度，提高载流子寿命[23]。在全钙钛矿叠层电池中，晶粒表面钝化策略被证明能够延长载流子扩散长度并实现超过 26% 的效率[24]。这说明微观结构与缺陷工程之间存在紧密联系。

综上所述，薄膜微观结构是连接制备参数与器件性能的关键桥梁。晶粒尺寸、晶体取向、膜厚分布及缺陷密度等因素相互耦合，共同决定载流子输运效率与复合损失水平。未来研究应进一步结合原位表征与多尺度分析方法，实现对结晶过程与微观结构演化的精确调控。

5 界面与传输层因素

薄膜成膜之后，器件的性能很大程度上取决于界面和传输层，因为它们决定了载流子选择性提取、界面复合和机械稳定性。本章从电子传输层(electron transport layer，ETL)、空穴传输层(hole transport layer，HTL)和界面钝化 3 个方面总结材料选择、界面工程和量化表征中的关键因素。

5.1 电子传输层材料选择

ETL 在钙钛矿太阳能电池中承担着远超“选择性提取电子”的多种功能。从能带工程视角，ETL 需与钙钛矿导带底形成匹配的能级阶梯，以降低界面电子注入势垒并抑制界面电荷积累；从缺陷化学视角，ETL 本身的体相缺陷(如 SnO_2 中的氧空位、TiO_2 中的 Ti^{3+})及其与钙钛矿界面处的悬挂键会引入非辐射复合中心；从离子迁移视角，致密且化学惰性的 ETL 可作为物理屏障阻挡 I^- 向电极的跨层迁移，防止 AgI 形成和电极腐蚀；从器件动力学视角，ETL 的电子迁移率和介电常数直接影响界面电荷积累程度，进而决定电流密度-电压迟滞行为的程度[25]。因此，ETL 的优化需要在能级匹配、缺陷钝化、离子阻挡和长期稳定性之间取得综合平衡。

5.1.1 金属氧化物电子传输层

SnO_2 和 TiO_2 是目前 n-i-p 结构中最主流的 ETL 材料。二者虽同属 n 型金属氧化物半导体，但在光电性能、化学稳定性和工艺兼容性方面存在显著差异。

(1)本征物理化学性质对比

SnO_2 具有更宽的带隙(SnO_2 3.6~4.0 eV *vs.* TiO_2 3.2~

3.5 eV)，可大幅减少紫外光照区寄生吸收；更高的电子迁移率(SnO_2 240 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ *vs.* TiO_2 0.1~1 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)，有利于快速电子提取；更低的制备温度($SnO_2 \leqslant 150$ ℃ *vs.* $TiO_2 \geqslant 500$ ℃)，可满足柔性器件制备需求[25, 26]。然而，SnO_2 表面存在大量氧空位和欠配位 Sn^{4+}，会形成能级缺陷，阻碍电子传输并诱发界面非辐射复合。TiO_2 则存在较低的电子迁移率、明显的光催化活性(加速钙钛矿紫外降解)，以及较强的电流密度-电压迟滞效应[27, 28]。

(2)掺杂策略与性能提升

为克服上述本征缺陷，掺杂工程被广泛采用。Mg^{2+} 掺杂 SnO_2 通过取代 Sn 位点，调节晶格常数与缺陷形成能，提升 ETL 电导率并优化 ETL-钙钛矿界面的导带能级匹配，使它与钙钛矿的导带对齐，促使器件开路电压和光电转换效率显著提高。Sb 掺杂 SnO_2 可抑制钙钛矿与 SnO_2 之间的氧化还原反应，减少界面陷阱态密度，降低非辐射电压损失。此外，金属盐掺杂策略也被证明可有效钝化 SnO_2 体相缺陷，提升电子迁移率并降低界面复合速率[25]。

(3)双层与复合电子传输层架构

为兼顾能级匹配、缺陷钝化和离子阻挡，双层 ETL 架构受到广泛关注。SnO_2/TiO_2 双层 ETL 利用级联能级排列，形成阶梯状导带结构，促进电子定向传输并抑制界面电荷积累，迟滞因子可从单层 TiO_2 的 3.51%降至 0.06%，器件效率达到 23.54%，50 d 以上保持>90%初始效率[27]。类似地，TiO_2/SnO_2 双层结构通过界面工程优化能带排列，开路电压达到 1.223 V，500 h 光照后保持 91%初始效率(纯 TiO_2 仅 67%)，且紫外光照 30 h 仅损失 10%初始效率(纯 TiO_2 损失 28%)[28]。

5.1.2　富勒烯基电子传输层

在倒置(p-i-n)结构中，富勒烯衍生物 C_{60} 和[6,6]-苯基-C61-丁酸异甲酯(PCBM)是最常用的 ETL 材料。与金属氧化物 ETL 不同，富勒烯基 ETL 通过溶液旋涂或真空蒸镀制备，具有低温工艺优势，但其功能机制与稳定性挑战也截然不同。

(1)C_{60} 的优势与局限

C_{60} 具有优异的电子提取能力和较高的电子迁移率，蒸镀 C_{60} 层(20~30 nm)可形成均匀的 ETL 覆盖。采用 30 nm C_{60} ETL 获得 25.8%认证效率，进一步优化 C_{60} ETL 实现 26.53%的性能[29]。然而，C_{60} 分子层与钙钛矿界面的结合较弱，易发生界面机械降解和分子聚集，且高纯度 C_{60} 的分离提纯成本较高[30]。

(2)PCBM 的挑战与改进

PCBM 作为溶液法制备的富勒烯 ETL，虽然制备工艺简便，但存在介电常数低、光氧化敏感性高、易形成电子陷阱等稳定性缺陷。此外，PCBM 在钙钛矿表面的覆盖不均匀性会导致钙钛矿与电极直接接触，形成复合中心和离子迁移通道[31]。二元复合 ETL 策略可有效改善覆盖均匀性并钝化表面缺陷，将效率提升至 22%以上。

(3)C_{60} 离子盐创新策略

2025 年，You 等[30]报道了一种 C_{60} 衍生离子盐 4(1′,5′-二氢-1′-甲基-2′H-[5,6]富勒烯-C_{60}-I_h[1,9-c]吡咯-2′-基)苯甲甲胺氯化物(CPMAC)，其 CH_2-NH_3^+ 头基增强了 ETL/钙钛矿界面结合力，离子特性提高了堆积密度，促使界面韧性比普通 C_{60} 体系提升约 3 倍。基于 CPMAC 的器件效率达 26%，65 ℃下运行 2100 h 仅衰减约 2%；小模块(6 cm^2)器件效率为 23%，55 ℃下运行 2200 h 衰减<9%。这一策略为倒置器件的商业化提供了关键路径。

5.2　空穴传输层材料与埋底界面

HTL 在钙钛矿太阳能电池中主要负责空穴的选择性提取与电子阻挡，其能级结构、界面缺陷状态以及化学稳定性均会对器件的开路电压和长期运行稳定性产生重要影响。因此，理想的 HTL 应与钙钛矿吸收层的价带形成良好的能级匹配，以降低界面电荷传输势垒，促进空穴的高效提取与定向输运。此外，HTL 较低的界面缺陷密度和优异的化学稳定性对于抑制界面退化、降低离子迁移诱导的性能衰减同样具有关键作用。

近些年来，自组装单层分子被普遍应用到倒置结构的埋底界面。代表性的 4-(7H-二苯并[c,g]咔唑-7-基)丁基膦酸(4PADCB)自组装单层分子可以改善界面覆盖均匀性与接触润湿性，并且促进大面积钙钛矿的均匀结晶，降低界面复合损失，提高串联器件效率(图 4)[32]。在此基础上，将自组装单层分子直接掺入前驱体溶液、在结晶过程中自发挤出并组装于埋底界面的自组装单分子层挤出工艺，进一步简化了制备流程并提升了界面钝化效果[33]。分子桥接策略，即用化学键合作用来改善界面电荷选择性和黏附性，从而提高柔性器件的机械稳定性，同时提高空穴抽取效率[34, 35]。因此，HTL 的设计要兼顾能级匹配和界面化学的稳定性，才能达到高效空穴传输和可靠运行的目的。

5.3　界面钝化策略

界面缺陷被认为是导致钙钛矿太阳能电池非辐射复合与开路电压损失的核心因素之一，所以，界面调控与缺陷钝化也成为提升器件效率与运行稳定性的关键研究方向。在钙钛矿/传输层界面处，未配位的 Pb^{2+}、卤素空位以及局部结构无序容易形成深能级陷阱态，这些缺陷会诱导载流子在界面区域发生非辐射复合，降低准费米能级分裂，并进一步加速离子迁移与界面退化过程。降低界面陷阱态密度、优化界面能级结构，对于提高电荷分离与提取效率具有重要意义。

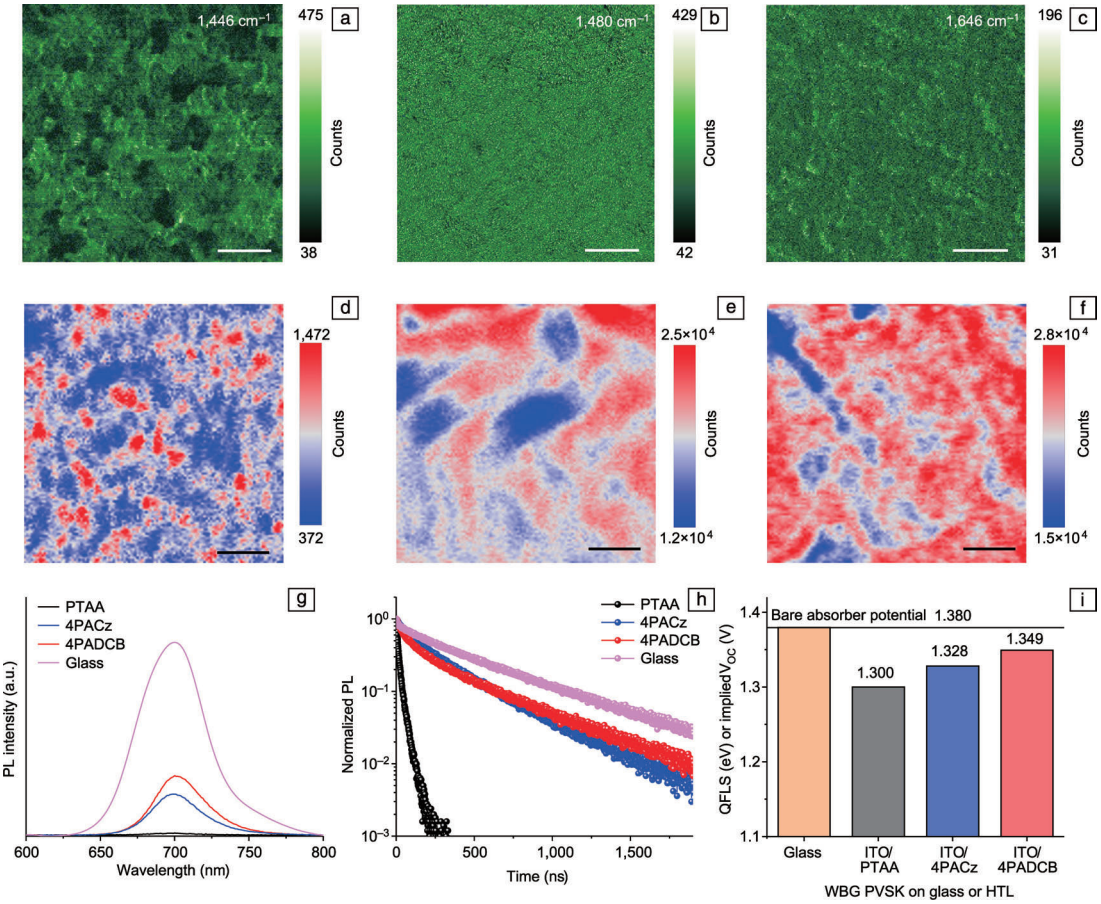


图 4 沉积于空穴传输层/铟锡氧化物基底上的钙钛矿薄膜光电性能表征[32]：(a~c)在不同波数下，对 PTAA、4PACz 和 4PADCB 进行光诱导表面电势成像；(d~f)沉积在 PTAA、4PACz 和 4PADCB 上的钙钛矿薄膜的共聚焦光致发光成像；(g~i)沉积在不同空穴传输层上生长的钙钛矿薄膜的稳态光致发光光谱、瞬态光致发光衰减曲线和准费米能级劈裂值

Fig. 4 Optoelectronic characterization of perovskite films deposited on hole-transport-layer-coated indium tin oxide substrates[32]: (a~c) light-induced surface-potential imaging of PTAA, 4PACz and 4PADCB at different wavenumbers; (d~f) confocal photoluminescence images of perovskite films deposited on PTAA, 4PACz and 4PADCB; (g~i) steady-state photoluminescence spectroscopy spectra, time-resolved photoluminescence spectroscopy decay curves and quasi-Fermi-level splitting values of perovskite films deposited on different hole-transport layers

研究者通常在钙钛矿表面或者埋底界面引入功能分子、低维钙钛矿结构或配位型界面层，以实现对界面缺陷的有效钝化。例如，长链有机阳离子构建的二维/三维异质结构，可以在保持三维主体吸收层优异光电性能的同时，对表面缺陷进行有效封堵、增强疏水性，从而提高钙钛矿结构环境稳定性以及器件性能[36]。此外，二维层状结构还能够调节界面能级排列，改善界面电荷输运行为，进一步降低界面复合损失。在倒置结构中，胺基分子 1,4-苯二胺二氢碘化物(PDAI$_2$)可以和钙钛矿形成配位作用，优化埋底界面结晶质量，改善局部晶体质量并降低界面缺陷密度[37]。除此之外，近年来发展的分子桥接、多功能分子修饰以及自组装界面层等方法，也为界面工程提供了新的思路。这些功能分子通常兼具缺陷钝化、能级调节与界面黏附增强等多重作用[34, 35]。因此，界面钝化并不仅仅是单纯降低缺陷密度的过程，更需要在“缺陷封堵”与“载流子传输”之间实现平衡。过强的绝缘性钝化层虽然能够有效抑制复合，但也可能阻碍电荷输运；而过薄或不稳定的界面层则难以实现长期稳定钝化。未来的界面工程研究需要进一步结合能级调控、界面化学与结构稳定性设计，实现器件效率与长期运行稳定性的协同提升。

6 器件整体结构与系统因素

在材料组分优化、薄膜结晶调控以及界面/传输层工程逐步逼近最优之后，钙钛矿太阳能电池的进一步效率提升与工程可转化性越来越受制于器件整体架构、尺度放大后的系统损耗以及稳定性封装体系。现有研究普遍指出：当小面积器件效率接近理论上限区间时，从实验

室小面积试样走向大面积组件与长期运行输出，瓶颈更多来自结构与系统层面的耦合约束，包括：① 结构选择带来的界面复合与离子迁移路径差异，② 规模化制备引入的膜层非均匀与互连/电阻/光学损耗，③ 湿热/光照/电偏压等应力下的退化与封装失效[38]。其中，“小面积器件与大面积模块之间的性能差距”已被明确视为商业化关键挑战之一[39]。

6.1　器件结构类型：n-i-p *vs.* p-i-n

6.1.1　结构差异与适配场景

如图 5，当前单结钙钛矿太阳能电池的主流结构可分为常规 n-i-p 与倒置 p-i-n 2 类。两者的差异并非仅是“层序颠倒”，而在于其不同的器件构型决定了选择性接触材料体系、制程温度窗口、界面化学反应与离子迁移的边界条件，进而系统性影响开路电压、填充因子、迟滞以及长期稳定性[40]。

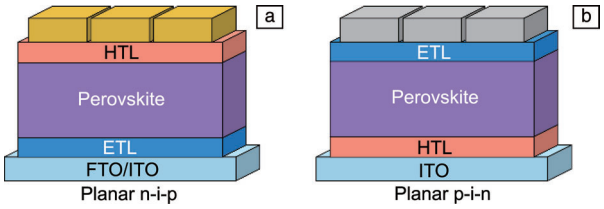


图 5　钙钛矿太阳能电池的 2 类核心平面异质结结构：(a) n-i-p 结构，(b) p-i-n 结构

Fig. 5　Two representative planar heterojunction architectures of perovskite solar cells: (a) the n-i-p architecture, (b) the p-i-n architecture

n-i-p(常规)结构通常为透明电极/ETL/钙钛矿/HTL/金属电极。该结构工艺体系成熟，历史上高效率器件记录较多；但常见 HTL 体系可能依赖掺杂/氧化来提升电导，叠加长期光照与偏压应力时更易诱发界面离子积累与副反应，从而带来开路电压/填充因子漂移与寿命衰减风险[41]。p-i-n(倒置)结构通常为透明电极/HTL/钙钛矿/ETL/金属电极。其优势在于低温制备兼容性强，更适合柔性衬底与叠层子电池集成；但其性能上限同样强依赖两端选择性接触的能级对齐、界面缺陷抑制与接触电阻控制，稍有偏差便会在填充因子与稳定性上放大体现[42]。

6.1.2　结构-界面-电学参数的归纳

综合现有文献，结构路线对光电转换效率的影响可沿 3 条电学主线归纳。

界面非辐射复合主导的开路电压损失。开路电压的提升核心在于降低非辐射复合，尤其是钙钛矿/传输层界面缺陷态与能级失配引起的复合损失。相关综述普遍指出：无论 n-i-p 还是 p-i-n，只要界面陷阱密度较高或形成不良接触，往往开路电压首先受限。例如，通过调控宽带隙钙钛矿薄膜的取向与缺陷，使非辐射复合降低，在全钙钛矿叠层中获得 29.1% 认证效率，说明“结晶/取向→缺陷与复合→开路电压/填充因子→叠层效率上限”的链条在结构层面具有代表性[43]。这一案例也提示：结构讨论需要回到界面复合边界条件的可控性，而非仅比较层序。

接触电阻与传输层电导主导的填充因子受限。填充因子对串联电阻与接触电阻极其敏感。倒置结构往往需要更精细的接触层/界面设计以避免接触电阻导致的填充因子受限；常规结构可通过 HTL 掺杂改善电导，但也可能带来稳定性代价(如吸湿掺杂剂触发湿热退化链条)[44]。因此，填充因子提升在工程化语境下应被理解为“低电阻接触-低副反应界面”的同时满足，而非单一电导最大化。

离子迁移-界面电荷积累导致的迟滞与运行漂移。稳定性共识强调：离子在光/热/电偏压下的迁移与界面堆积，会导致能带弯曲、局部电场增强与界面反应加速，表现为迟滞、最大功率点漂移以及开路电压/填充因子持续衰减。因此，结构选择应被视为“界面化学与离子迁移边界条件”的选择，而非仅以初始效率排序。

6.2　大面积制备：均匀性与系统损耗

从小面积器件(多为旋涂)走向大面积器件/组件时，器件效率往往会出现明显下降，其根本原因在于“薄膜横向非均匀性”与“模块化系统损耗”2 类因素相互耦合。对于小面积器件而言，旋涂工艺能够在较小范围内快速形成均匀薄膜，并较容易实现对结晶动力学、膜厚及界面状态的精准控制。然而，当器件面积扩大至厘米级甚至模块尺度后，成膜动力学与器件工作机制会发生显著变化，导致实验室条件下建立的工艺窗口难以直接迁移至规模化制造体系。趋势性综述普遍指出，小面积高效率器件与大面积模块之间存在显著性能差距，这一差距不仅反映了材料与工艺在放大过程中的适应性问题，也与规模化制造窗口、生产良率以及长期稳定性密切相关[39]。

6.2.1　薄膜非均匀性：面积放大后的统计失效

在可扩展工艺中，提升平均性能与良率往往比刷新单个器件性能更关键。面积放大后，成膜厚度、组分分布、晶粒/缺陷与界面覆盖的空间波动会以统计方式放大，表现为开路电压/填充因子分布变宽、局部短路或漏电概率升高，并进一步触发热斑与加速退化。以钙钛矿/硅单片叠层为例(图 6)[45]，硅基底上周期性纳米纹理的引入不仅降低反射损失，也显著改善溶液法钙钛矿成膜的工艺鲁棒性：同批次对比中，纳米纹理将可用器件制备良率由约 50%提高到约 95%，并伴随~15 mV 的开路电压统计提升。该结果表明：几何/光学结构设计可以通过改善润湿与成核生长边界条件[46]，间接提升大面积工艺窗口与一致性，从而把“面积问题”从偶发成功转向可复制制造。

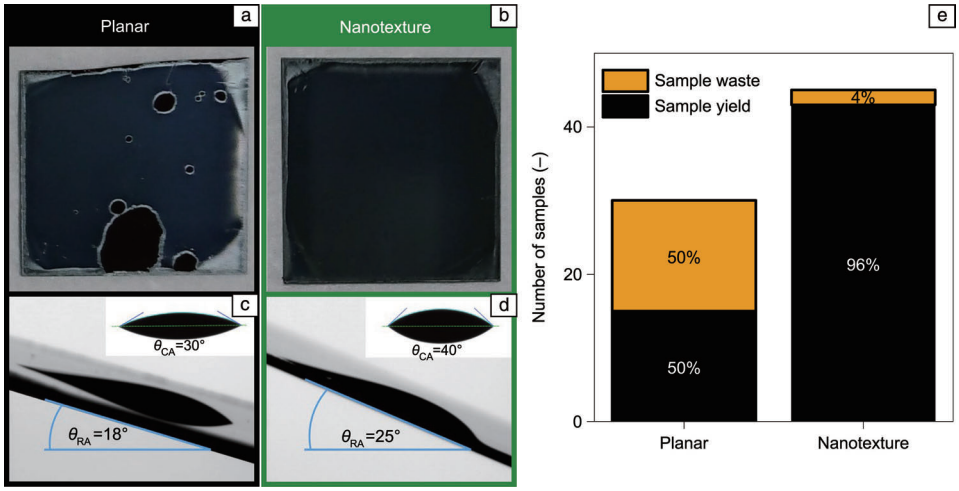


图 6 钙钛矿薄膜质量与润湿性(接触角)之间的直接关联[45]:(a,b)平面硅基底和纳米纹理硅基底上经 Me-4PACz 修饰后旋涂制备的代表性钙钛矿薄膜,(c,d)平面硅基底与纳米纹理硅基底上钙钛矿溶液液滴的侧面照片,(e)平面与纳米纹理硅基底上制备的钙钛矿/晶体硅叠层太阳能电池的成膜产率

Fig. 6 Direct correlation between perovskite film quality and substrate wettability (contact angle)[45]: (a, b) representative spin-coated perovskite films on Me-4PACz-modified planar and nanotextured silicon substrates, (c, d) side-view photographs of perovskite solution droplets on planar and nanotextured silicon substrates, (e) film-formation yield of perovskite/crystalline-silicon tandem solar cells fabricated on planar and nanotextured silicon bottom cells

6.2.2 模块系统损耗:从器件效率到组件效率的损耗分解

除均匀性外,组件效率还受到“模块层”损耗的系统性制约[40]。模块损耗可定性分为 4 类:①几何死区与互连损耗(如刻划区/电池间距带来的有效受光面积下降);②电阻损耗(透明导电氧化物、金属栅线、互连与接触电阻导致的串联电阻上升);③光学损耗(封装/电极/缓冲层寄生吸收与反射、散射导致的光管理效率降低);④缺陷放大与热效应(局部缺陷引发的旁路、热斑与输出不稳定)。因此,大面积设计需要在“互连布局-电阻控制-光学管理”之间协同权衡,而非单点最优。

2024~2025 年,钙钛矿组件效率实现了多个里程碑式突破,标志着该技术从实验室走向产业化的关键转折。Wang 等[47]通过向 $FAPbI_3$ 中引入 2-(1-环己烯基)乙铵阳离子,构建水平覆盖表面并垂直穿透晶界的高迁移率二维钙钛矿,将 PbI_2 和 δ-$FAPbI_3$ 杂质转化为稳定二维相,在 715.1 cm^2 孔径面积组件上实现了 22.46%认证效率,填充因子高达 81.21%。Nazeeruddin 团队[48]采用 MACl 掺杂与 Lewis 碱性离子液体[Bcmim]Cl 协同策略,在 27.22 cm^2 组件上获得 22.97%认证效率;进一步引入 $[MTTZ]^+$阳离子进行优化,使组件认证效率超过 23.2%(稳态 23.0%),创造了当时组件效率世界纪录。最具标志性的是,光因科技有限公司于 2025 年 6 月宣布其商用钙钛矿组件(1.2 m×0.6 m)获得中国国家计量院认证的 20.7%效率,成为首个突破平方米级 20%效率门槛的钙钛矿组件,输出功率达 149 W。该公司同步建成 200 MW 量产线并投入商业交付,标志着钙钛矿光伏正式进入商业化量产阶段。

在薄膜叠层路线中,光学优化常通过“减反/减寄生吸收/电极与缓冲层结构设计”实现。在钙钛矿/铜铟镓硒(CIGS)单片叠层中,当子电池电流出现不匹配时,研究通过外量子效率与光学仿真锁定可制造约束下的最优堆栈参数,使匹配电流接近 19.9 $mA\cdot cm^{-2}$,且对应效率潜力可达 32%(基于合理开路电压与填充因子假设)[49]。该案例说明:系统损耗并非只来自材料本征,器件堆栈的光学结构与模块约束同样决定叠层器件效率上限与工程路径(图 7)[50]。

因此面积放大的核心不只是效率下降,而是“均匀性下降、子电池互连、串联电阻、光学损耗与缺陷放大”的耦合问题;工程上应以良率、一致性与组件损耗分解为主指标来组织优化路径[39]。

6.3 稳定性与封装:结构-封装协同

稳定性问题本质上是“材料-界面-器件-封装-运行环境”多尺度耦合,其退化过程贯穿从原子缺陷到器件系统失效的多个层级。与传统硅基光伏相比,钙钛矿材料具有离子键特征明显、晶格较软以及离子迁移活性较高等特点,因此其稳定性不仅受到外界环境因素的影响,还与材料内部结构演化和界面化学变化密切相关。有综述研究指出,钙钛矿太阳能电池退化并非单一因素主导,而是由水分、氧气、光照、热应力及电偏压等多种外界刺激触发,与器件内部移动离子、缺陷演化、金属迁移

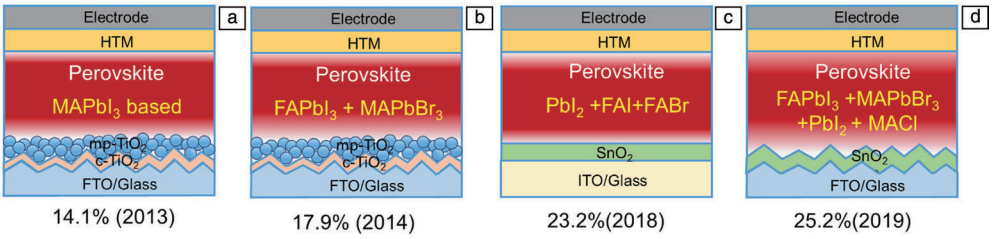


图 7　钙钛矿太阳能电池结构与材料配方演进及认证光电转换效率提升趋势(2013~2019)[50]

Fig. 7　Evolution of perovskite solar cell architectures and material compositions, together with the trend in certified power conversion efficiency from 2013 to 2019[50]

与界面反应强耦合；因此稳定性提升研究的方向，将从单一材料层面的缺陷修复逐渐转向覆盖材料、界面、器件结构与封装工程的系统化协同优化[51]。

6.3.1　退化的共识框架：外界应力×移动离子

在湿热条件下，水和氧气渗入会触发钙钛矿分解与界面副反应；在持续光照、升温与电偏压下，离子迁移与缺陷活化加速，导致界面电荷积累与能带畸变，最终体现为开路电压/填充因子持续衰减与功率点漂移。因而，“移动离子与外部应力共同决定器件可靠性”已成为稳定性综述的核心叙事线[51]。

6.3.2　结构-封装对策与评价：把不确定环境转化为可控边界条件

从工程化视角，可将稳定性提升路径概括为“结构抑制-封装约束-评价规范”3 组措施：①结构抑制：通过界面钝化与阻离子策略降低界面反应活性与离子堆积，优化选择性接触以减少局部电场与副反应；②封装约束：通过阻隔层与边封降低水和氧气透过并抑制侧向渗入，同时关注封装材料的热-力学行为，避免热循环导致裂纹、脱黏与局部失效；③评价规范：采用更贴近实际运行的测试条件(如最大功率点持续输出)，并结合湿热、热循环、光浸与偏压耦合等加速应力，评估“输出保持-失效模式-可修正边界条件”的对应关系[51]。

封装的目标不仅是阻隔水和氧气，还包括维持器件长期运行所需的化学稳定性与热机械可靠性。阻隔层用于降低水和氧气的透过，边缘密封用于抑制侧向渗入，其界面黏结的稳定性有助于降低边缘脱黏风险；封装材料的热机械性能则影响热循环过程中的应力积累、裂纹扩展与界面失效。因此，封装策略应与器件结构协同设计，并考虑活性层对缺陷及局部应力的敏感性，以降低局部缺陷或热斑诱发封装失效、进而加速器件退化的风险[38]。

同时，封装会改变光学入射与器件堆栈的最优设计。钙钛矿/CIGS 单片叠层相关研究指出：实际模块采用玻璃与封装胶膜时，会引入额外反射与紫外区寄生吸收，使光生电流降低约 1 mA·cm^{-2}，并可能使最优带隙发生轻微偏移；但其光学最优层厚总体仍相对稳定，意味着实验室最优结构可较平滑迁移到封装模块设计，只需针对封装引入的光学损失进行修正[43]。图 8 展示了 2 种薄膜太阳能电池材料在不同波长下的光学响应[43]。封装前后，入射光的分配比例略有变化，表明封装会对器件的光学行为产生一定影响，与前述分析一致。最后，稳定性提升应以结构-封装协同组织：通过结构优化抑制离子迁移及不利界面反应，通过封装调控器件所处的化学环境与热机械条件，并结合最大功率点跟踪与耦合应力测试，建立具有可比性、可用于不同器件体系的可靠性评价框架[42]。

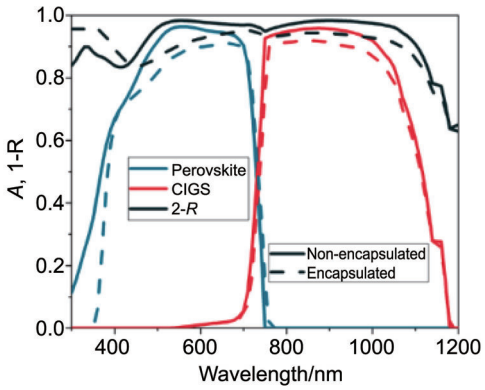


图 8　钙钛矿与 CIGS 薄膜太阳能电池封装前后光学性能对比[43]

Fig. 8　Comparison of the optical properties of perovskite and CIGS thin-film solar cells before and after encapsulation[43]

7　结　语

从原材料到器件集成，钙钛矿太阳能电池的每个制备环节都会影响最终的效率与稳定性，这些环节层层递进、相互耦合。原材料决定了结晶起点，成膜工艺调控晶粒生长，微观结构影响载流子输运，界面工程减少复合损失，器件结构和封装方式则决定了能否从小面积生产走向大面积应用。单一环节的优化已经很难带来明显效率突破，未来的研究更需要把前驱体化学、反溶剂工艺、界面钝化分子当作一个整体来匹配设计，同时借助

原位表征手段厘清结晶和离子迁移的过程，为工艺控制提供实实在在的依据。稳定性测试也应该有一套公认的规范，采用最大功率点跟踪输出、统一湿热老化及热循环测试等评价方式，使不同实验室的结果具有可比性。大面积制备方面，溶剂体系、互连结构和封装材料均需重新考虑，不可照搬小面积旋涂经验。无铅材料和绿色工艺开发也是长远发展必由之路。总之，从实验室到量产，关键不是追求某个环节的最优，而是让各个环节协同起来，把研究中发现的规律真正应用到大面积制备中去。

参考文献 References

[1] GREEN M A, DUNLOP E D, YOSHITA M, *et al*. Joule[J], 2026, 10(7): 102494.

[2] YANG, T, ZHAO E, WU N, *et al*. Nature[J], 2026, 654(8119): 660-667.

[3] LIN R, GAO H, LOU J, *et al*. Nature[J], 2025, 648(8094): 600-606.

[4] JIA L, XIA S, LI J, *et al*. Nature[J], 2025, 644(8078): 912-919.

[5] SUN K, HU Z, SHEN B, *et al*. ACS Applied Energy Materials[J], 2018, 1(5): 2114-2122.

[6] DENG Y, LI X, WANG, R. ACS Sustainable Chemistry & Engineering[J], 2022, 10(30): 9946-9955.

[7] LIU S, MIAO T, ZHANG Y, *et al*. ACS Energy Letters[J], 2026, 11(4): 3121-3147.

[8] LIN R, XIAO K, QIN Z, *et al*. Nature Energy[J], 2019, 4(10): 864-873.

[9] ZHU P, WANG D, ZHANG Y, *et al*. Science[J], 2024, 383(6682): 524-531.

[10] DUAN C, GAO H, XIAO K, *et al*. Nature Energy[J], 2024, 10(3): 318-328.

[11] JEON N J, NOH J H, KIM Y C, *et al*. Nature Materials[J], 2014, 13(9): 897-903.

[12] XIAO Z, DONG Q, BI C, *et al*. Advanced Materials[J], 2014, 26(37): 6503-6509.

[13] NIE W, TSAI H, ASADPOUR R, *et al*. Science[J], 2015, 347(6221): 522-525.

[14] DENG Y, PENG E, SHAO Y, *et al*. Energy & Environmental Science[J], 2015, 8(5): 1544-1550.

[15] MEI A, LI X, LIU L, *et al*. Science[J], 2014, 345(6194): 295-298.

[16] PARK N G. Materials Today[J], 2015, 18(2): 65-72.

[17] DONG Q, FANG Y, SHAO Y, *et al*. Science[J], 2015, 347(6225): 967-970.

[18] NIU T, LU J, MUNIR R, *et al*. Advanced Materials[J], 2018, 30(16): e1706576.

[19] FAN H, LI F, WANG P, *et al*. Nature Communications[J], 2020, 11: 5402.

[20] AL-ASHOURI A, KÖHNEN E, LI B, *et al*. Science[J], 2020, 370(6522): 1300-1309.

[21] MENG Y, WANG Y, LIU C, *et al*. Advanced Materials[J], 2024, 36(6): e2309208.

[22] STRANKS S D, EPERON G E, GRANCINI G, *et al*. Science[J], 2013, 342(6156): 341-344.

[23] BALL J M, LEE M M, HEY A, *et al*. Energy & Environmental Science[J], 2013, 6(6): 1739-1743.

[24] LIN R, XU J, WEI M, *et al*. Nature[J], 2022, 603(7899): 73-78.

[25] 崔玉鹏, 弓爵, 刘明侦. 激光与光电子学进展[J], 2024, 61(5): 0516002.
CUI Y P, GONG J, LIU M Z. Laser & Optoelectronics Progress[J], 2024, 61(5): 0516002.

[26] ALTINKAYA C, AYDIN E, UGUR E, *et al*. Advanced Materials[J], 2021, 33(15): 2005504.

[27] CHENG J H, YANG Y C, WANG L, *et al*. Chemical Research in Chinese Universities[J], 2026, 42(1): 334-342.

[28] TAVAKOLI M M, YADAV P, TAVAKOLI R, *et al*. Advanced Energy Materials[J], 2018, 8(23): 1800794.

[29] YUN S, LIM J, KIM J, *et al*. Chemistry Methods[J], 2025, 5(10): e202500015.

[30] YOU S, ZHU H W, SHEN Z J, *et al*. Science[J], 2025, 388(6750): 964-968.

[31] GONG C, LI H, XU Z, *et al*. Nature Communications[J], 2024, 15: 9154.

[32] HE R, WANG W H, YI Z J. Nature[J], 2023, 618(7963): 80-86.

[33] ZHENG X, LI Z, ZHANG Y, *et al*. Nature Energy[J], 2023, 8(5): 462-472.

[34] LI L D, WANG Y R, WANG X Y. Nature Energy[J], 2022, 7(8): 708-717.

[35] XU W Z, CHEN B, ZHANG Z. Nature Photonics[J], 2024, 18(4): 379-387.

[36] HU Y, SCHLIPF J, WUSSLER M, *et al*. ACS Nano[J], 2016, 10(6): 5999-6007.

[37] LU H, ZHANG H, GUO J K, *et al*. ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2026, 18(1): 2306-2314.

[38] WANG Y, AHMAD I, LEUNG T, *et al*. ACS Materials Au[J], 2022, 2(3): 215-236.

[39] ZHOU H, CAI K, YU S, *et al*. Nature Communications[J], 2024, 15: 6679.

[40] ZHANG X, WU S, ZHANG H, *et al*. Nature Photonics[J], 2024, 18(12): 1243-1253.

[41] FENG Q, LIU K K, WANG D, *et al*. Nature Energy[J], 2026, 11(6): 830-842.

[42] LIU L, HUANG X, JEN A K. Chemical Science[J], 2026, 17(11): 5351-5366.

[43] LIU Z, LIN R, WEI M, *et al*. Nature Materials[J], 2025, 24(2): 252-259.

[44] ZHANG T, WANG F, KIM H B, *et al*. Science[J], 2022, 377

(6605)：495-501.

[45] TOCKHORN P, SUTTER J, CRUZ A, *et al*. Nature Nanotechnology [J], 2022, 17(11)：1214-1221.

[46] PENG W, MAO K, CAI F, *et al*. Science[J], 2023, 379(6633)：683-690.

[47] WANG H, SU S, CHEN Y, *et al*. Nature[J], 2024, 634(8036)：1091-1095.

[48] DING B, DING Y, PENG J, *et al*. Nature[J], 2024, 628(8007)：299-305.

[49] JOŠT M, KHNEN E, AL-ASHOURI A, *et al*. ACS Energy Letters [J], 2022, 7(4)：1298-1307.

[50] KIM G H, KIM D S. Joule[J], 2021, 5(5)：1033-1035.

[51] ZHU H, TEALE S, LINTANGPRADIPTO M N, *et al*. Nature Review Materials[J], 2023, 8(9)：569-586.