

文章编号: 1000-7032(2026)05-0765-11

偏压诱导下钙钛矿太阳能组件性能演变的 电-热-光耦合机制研究

肖 泽^{1,2,3}, 马梦恩^{1,2,3}, 吴绍航^{1,2,3,4}, 陈 谦³, 刘 冲^{1,2,3},
范建东^{1,2,3}, 李闻哲^{1,2,3}, 麦耀华^{1,2,3*}

(1. 暨南大学 新能源技术研究院, 广东 广州 510632;

2. 暨南大学 广东省高校新型半导体与器件重点实验室, 广东 广州 510632;

3. 广东脉络能源有限公司, 广东 珠海 519075;

4. 脉络能源常德新能源技术研究院, 湖南 常德 415199)

摘要: 大面积钙钛矿太阳能电池组件性能的测试不稳定性源于其内部界面电荷分布与输运的亚稳态。本文提出采用正向偏压电激活调控该亚稳态, 并通过原位电致发光成像揭示了其空间非均匀性演化机理。研究发现, 施加 10 V 偏压可在 30 min 内实现稳定、高效激活(效率恢复至 99%), 其本质是通过优化电荷提取、降低串联电阻, 从而同步提升填充因子与开路电压, 并显著改善组件发光的均匀性。然而, 过高的偏压(≥ 12.5 V)会诱发局部热积累, 导致钙钛矿材料或界面发生不可逆损伤, 并在电致发光图像中呈现为从正极侧出现的暗斑。本研究从光电子产生-复合-输运的耦合关系出发, 厘清了电激活的优化路径与失效阈值, 为钙钛矿组件的可靠测试与性能调控提供了兼具理论与实用价值的方案。

关键词: 钙钛矿太阳能电池组件; 电激活; 电致发光; 温度效应; 电性能稳定性

中图分类号: TM914.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260006

CSTR: 32170.14.CJL.20260006

Unveiling Electro-Thermal-Optical Coupling Mechanism in Bias-induced Performance Evolution of Perovskite Solar Modules

XIAO Ze^{1,2,3}, MA Meng'en^{1,2,3}, WU Shaohang^{1,2,3,4}, CHEN Qian³, LIU Chong^{1,2,3},
FAN Jiandong^{1,2,3}, LI Wenzhe^{1,2,3}, MAI Yaohua^{1,2,3*}

(1. Institute of New Energy Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. Key Laboratory of New Semiconductors and Devices of Guangdong Higher Education Institutes,
Jinan University, Guangzhou 510632, China;

3. Guangdong Mellow Energy Co., Ltd., Zhuhai 519075, China;

4. Mellow Energy Changde Institute of New Energy Technology, Changde 415199, China)

* Corresponding Author, E-mail: yaohuamai@jnu.edu.cn

Abstract: The instability in performance testing of large-area perovskite solar cell modules originates from the metastable state of internal interfacial charge distribution and transport. This study proposes the use of forward bias voltage as an electrical activation method to regulate this metastability, and reveals its spatially heterogeneous evolution mechanism through *in-situ* electroluminescence imaging. It is found that applying a 10 V bias enables rapid and stable activation within 30 min (efficiency recovery to 99%). The underlying mechanism is the optimization of charge extraction and reduction of series resistance, which simultaneously enhances the fill factor and open-circuit voltage, and significantly improves the spatial uniformity of module luminescence. However, excessive bias voltage (≥ 12.5 V)

收稿日期: 2026-01-06; 修订日期: 2026-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(62475103)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62475103)

induces localized heating accumulation, leading to irreversible quenching damage in the perovskite material or interfaces, manifested as dark spots originating from the positive electrode side in electroluminescence images. Starting from the coupled relationship of photogeneration, recombination, and transport of charge carriers, this research clarifies the optimization pathway and failure threshold of electrical activation, providing a solution with both theoretical and practical value for reliable testing and performance regulation of perovskite modules.

Keywords: perovskite solar modules; electrical activation; electroluminescence; temperature effect; performance stability

1 引 言

随着钙钛矿太阳能电池效率逐步接近商业化要求,研究重点已由早期的小面积实验室器件转向大面积组件及其长期稳定运行性能^[1-4]。然而,相较于单结小面积器件,大面积钙钛矿组件通常采用多子电池串联结构,其电学行为更为复杂,从而增加了效率评估的不确定性^[5]。已有研究表明,钙钛矿器件在外界刺激条件下往往呈现明显的激活行为^[6-7]。该现象已在光照处理、热处理及外加电场作用下被广泛观察,并普遍归因于界面电荷重排、离子迁移行为以及缺陷态的动态调控^[8]。尤其是在连续光照或偏压条件下,钙钛矿层及其界面处的电场分布会发生重构,从而影响载流子的分离、输运与复合过程^[9-12]。电激活作为一种无需光照即可诱导器件性能演化的重要手段,发展一种可控、有效的激活方法以实现组件电性能的快速稳定,对钙钛矿组件的表征与应用具有重要意义^[13-17]。正向电压偏置作为一种电激活手段,已被证实可在一定程度上改善钙钛矿器件的电性能^[18-20]。在正向偏置条件下,郑志江等通过对老化钙钛矿太阳能电池施加偏置电压,实现了器件性能的有效恢复,其光电转换效率由 17.8% 提升至 21.5%,并在 100 h 最大功率点跟踪测试中获得了 3.1% 的总能量增益^[21]。原位表征结果表明,偏置电压可抑制离子在界面处的非均匀堆积并钝化缺陷态,从而协同改善载流子提取与输运过程。Huang 等在暗态条件下对钙钛矿太阳能电池施加 -0.4 V 反向偏置约 3 min,使器件开路电压由 1.10 V 提升至 1.16 V,光电转换效率由 22.13% 提高至 23.48%。该性能提升归因于电场驱动下碘离子向 SnO₂/钙钛矿界面的定向迁移与积累,从而填补界面碘空位并钝化 SnO₂ 表面氧空位,增强界面内建电场与电荷转移能力,第一性原理计算进一步证实缺陷浓度降低的界面具有更优的载流子输运特性^[22]。然而,现有研究主要集中于小面

积器件层面,对于大面积串联组件^[23-24]而言,不同偏置电压条件下的激活效率、温度演变及潜在损伤风险仍缺乏系统研究。尤其是在较高偏压下,热积累及其对器件结构完整性和性能稳定性的影响尚不明确,有必要结合温度监测与空间分辨表征手段加以深入分析^[25-32]。

基于此,本文以大面积钙钛矿太阳能电池组件为研究对象,系统研究了不同正向电压偏置条件下的电激活行为。通过对组件效率演化、电参数变化、温度响应以及电致发光特性的综合表征,明确了适宜的电激活电压窗口,并揭示了高偏压条件下的热失效特征及其空间分布规律。相关结果为钙钛矿组件电性能的准确测试与稳定评估提供了实验依据,对其工程化应用具有一定参考价值。

2 实 验

2.1 电池制备

本工作研究对象为倒置平面异质结钙钛矿太阳能电池组件,器件结构为 Glass/ITO/HTL(Poly-4PACz)/PVK (FA_{0.9}CS_{0.1}PbI₃)/ETL (C₆₀/SnO₂)/Ag。器件采用“溶液涂布—真空蒸镀—激光划线—组件封装”的工艺路线制备^[33-35],如图 1(a)所示。制备流程如下:(1)透明导电基底选用 300 mm×300 mm 商用 ITO 玻璃(方块电阻 15 Ω)。基底首先采用功率 4.56 W、扫描速度 1 200 mm·s⁻¹ 的纳秒红外激光完成 P1 划线,随后依次在 CY-1002 低泡清洗剂、去离子水、无水乙醇和异丙醇中超声清洗各 15 min。清洗后基底干燥 2 h,并经紫外臭氧处理 10 min 以去除有机污染并提升表面亲水性。(2)空穴传输层 HTL 采用自组装单分子层材料 Poly-4PACz。溶液在氮气手套箱中配制并超声 30 min 后,于 20 °C 空气环境下采用刮涂法沉积,刮刀间隙为 350 μm,刮涂速度为 2 mm·s⁻¹,成膜后在室温下静置 5 min。(3)钙钛矿吸光层 PVK 采用 FA_{0.9}CS_{0.1}PbI₃ 组成。在氮气手套箱中按比例称取

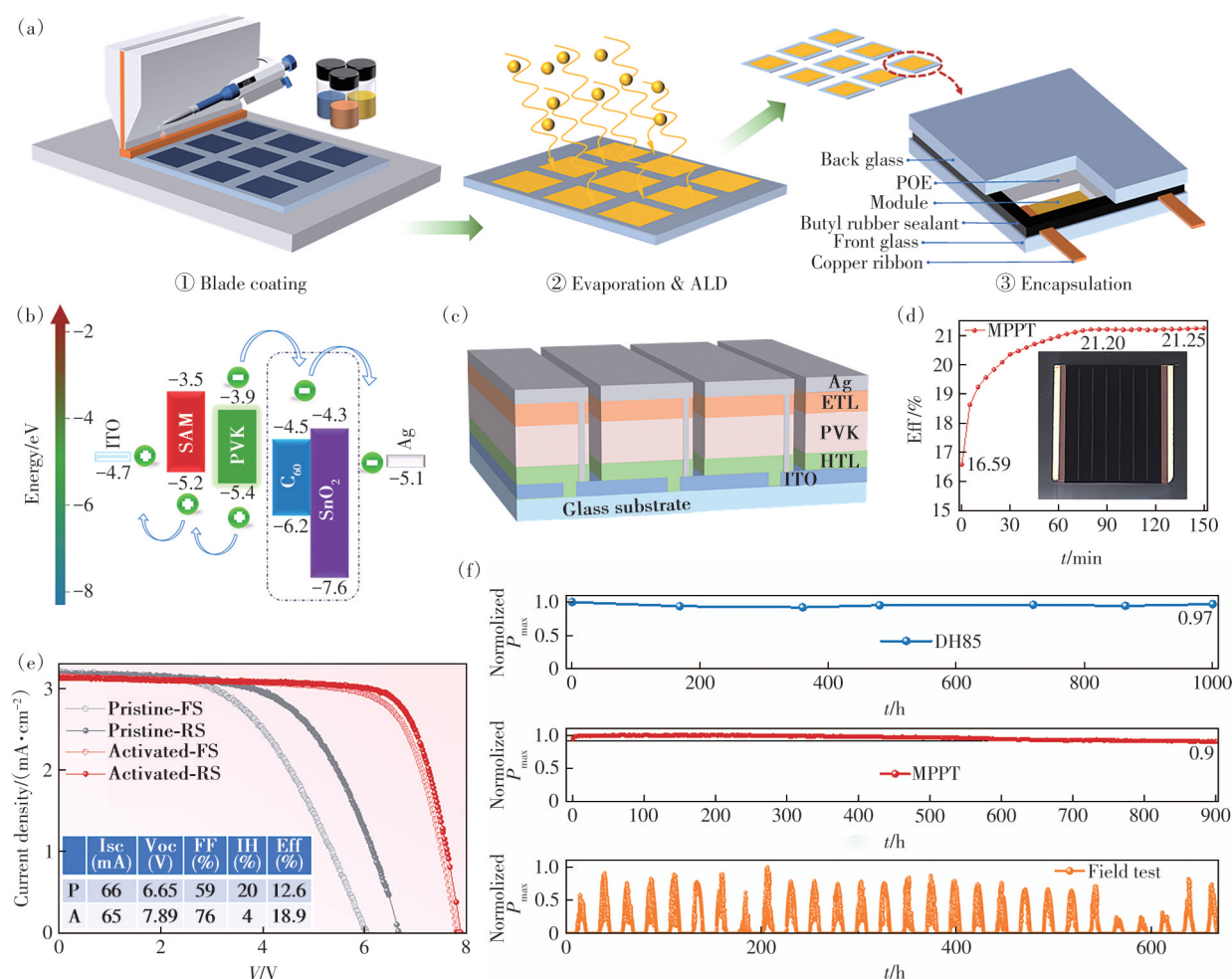


图1 大面积钙钛矿太阳能组件的制备流程、结构及性能表征。(a)大面积组件的制备与封装流程示意图;(b)组件中各功能层的能级排列示意图;(c)组件结构及P1~P3激光划线串联示意图;(d)组件在最大功率点跟踪(Maximum power point tracking, MPPT)条件下的效率演化曲线;(e)不同测试历史下组件的 J - V (Current-voltage measurement, J - V)特性曲线,FS表示正向扫描(Forward scan),RS表示反向扫描(Reverse scan);(f)组件的稳定性测试结果,包括双85老化、连续光照MPPT和实际电站运行性能

Fig.1 Fabrication, structure, and performance characterization of large-area perovskite solar modules. (a) Schematic illustration of the fabrication and encapsulation process. (b) Energy level alignment of the functional layers. (c) Module structure with P1-P3 laser scribing for series interconnection. (d) Efficiency evolution under maximum power point tracking (MPPT). (e) J - V characteristics under different testing histories, where FS denotes forward scan and RS denotes reverse scan. (f) Stability performance including damp heat aging, continuous-illumination MPPT, and field operation results

CsI、FAI与 PbI_2 以DMF/DMSO(体积比4:1)为溶剂,在60℃条件下加热3~4h直至完全溶解。钙钛矿薄膜在空气中通过刮涂法沉积,湿膜成型后立即进行真空辅助结晶(VCD)处理30s,随后在120℃条件下先红外退火120s,再热台退火20min以获得黑相钙钛矿薄膜。(4)电子传输层ETL采用 $\text{C}_{60}/\text{SnO}_2$ 双层结构。其中 C_{60} 在 5.0×10^{-4} Pa真空度下以 $0.05 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率热蒸发沉积30nm; SnO_2 通过原子层沉积法制备,TDMA-Sn前驱体加热至60℃,反应腔体温度为110℃,以 N_2 为载气,沉积200个循环得到约20nm薄膜。 SnO_2

沉积完成后,采用功率0.25W、扫描速度 $680 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的激光完成P2划线。(5)金属顶电极Ag在 5.0×10^{-4} Pa真空环境下以 $0.3 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率热蒸发沉积150nm,随后采用功率0.25W、扫描速度 $1400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的激光刻蚀Ag/ETL/PVK/HTL形成P3划线。所得组件由7个子电池串联构成,其几何填充因子为96.29%。(6)制备完成后,整片 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 基板经清边处理并裁切为9个 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 组件。组件采用 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 白玻璃作为盖板,聚烯烃弹性体(POE)膜作为封装中间层,边缘使用丁基胶密封,

并通过导电铜箔引出电极。最终在真空环境下于 120 °C 条件下层压 20 min 完成封装。所有组件在电激活实验前均置于暗态环境中静置 24 h, 以确保器件回到初始未激活状态。

相应的能级结构如图 1(b) 所示, 各功能层之间能级匹配合理, 为载流子的定向输运提供了有利条件^[36-39]。组件内部的串联结构如图 1(c), 这一结构设计在保证高工作电压的同时, 也引入了明显的电流分布与局域偏压特征^[40-42], 为后续激活行为与失效模式的空间差异提供了结构基础。

2.2 电池性能及其稳定性

在该组件基础上进行最大功率点跟踪 (Maximum power point tracking, MPPT) 可以观察到显著的效率演变行为。如图 1(d) 所示, 组件在标准光照 (AM 1.5 G, 100 mW·cm⁻²)、室温封装、空气、相对湿度 45% 条件下进行 MPPT, 其效率由初始的 16.59% 持续提升至 21.25%, 提升过程持续约 80 min。值得注意的是, 该效率提升并非源于材料或结构的不可逆变化, 而是在工作过程中存在明显的动态激活行为^[43-49]。这一现象直接指向常规 *J-V* 测试结果可能受到测试历史的显著影响。进一步的 *J-V* 测试结果图 1(e) 证实了上述判断。本文中所涉及的正向扫描 (Forward scan, FS) 与反向扫描 (Reverse scan, RS) 分别对应 *J-V* 测试 (Current-voltage measurement, *J-V*) 过程中由短路电流状态向开路电压方向扫描以及其反向扫描过程。初始状态下, 组件表现出较低的短路电流 (66 mA)、开路电压 (6.65 V) 与填充因子 (59%), 同时正反向扫描之间存在显著迟滞 (约 20%), 对应的转换效率仅为 12.6%。随着测试次数增加, 每次测试过程中的短时光照 (17 s) 与正反向电压扫描逐渐引发性能提升, 器件填充因子提高至 76%, 迟滞显著减小至 4%, 效率同步提升。这一结果表明, 即便在不引入额外激活步骤的情况下, 测试过程本身亦可对器件性能产生影响, 从而导致效率结果的不稳定与不可比。值得注意的是, 本文所采用的均为工艺成熟的高效率钙钛矿组件, 而存在严重缺陷的低效率组件在高偏压下更易发生击穿或失效, 不在本文所讨论的范围。不同初始效率组件在正向偏置电场作用下均表现出显著的电激活行为, 其特征并不体现在最终效率的绝对值, 而在于激活前后效率差值的相似性。如图 1(d) 所示, 初始效率为 16.59% 的组件在 MPPT 激活后效率提升

至 21.2%; 而图 1(e) 中初始效率为 12.6% 的组件在激活后达到 18.9%。尽管两者的初始性能水平存在差异, 但其效率提升幅度均集中在约 5%~6% 区间, 表明电激活反映的是偏置电场诱导的离子重排与界面电势重构这一普适过程, 而非仅针对低效率组件的“修复效应”^[50]。

尽管上述组件在长期稳定性方面表现优异 (图 1(f)), 包括在 85 °C/85% 相对湿度条件下 1 000 h 仍保持 97% 初始效率、在 1 000 W·m⁻² 连续光照下 MPPT 老化 900 h 后效率保持在 90% 以上, 以及在实际电站运行中 700 h 内未观察到明显衰减, 但一旦器件经历闲置过程, 其性能状态会再次回到未激活水平, 导致测试结果出现显著波动。该现象表明, 器件的“稳定性”与“测试可重复性”并非等价概念^[51], 在组件尺度上获得可靠效率数据, 必须对其激活过程进行系统控制与定量研究。

3 结果与讨论

3.1 正向偏置下组件电参数演化

为实现电池性能的可控激活并排除测试过程本身带来的干扰, 为系统评估正向电压偏置对钙钛矿电池组件电性能演变的影响, 构建了如图 2(a) 所示的测试平台。为保证电激活过程中组件电性能演化评估的准确性与可重复性, 本文对测试流程进行了严格规范。实验样品选取自同一批次在 300 mm×300 mm 大面积基底上制备并裁切得到的 70 mm×70 mm 钙钛矿组件, 以确保初始性能的可比性。所有组件在完成层压封装后均置于暗态环境中静置 24 h, 使器件充分退激活并恢复至稳定初始状态。电性能测试在标准 AM 1.5 G 条件下进行, 光强校准为 1 000 W·m⁻²。*J-V* 特性采用双向扫描模式测量, FS 电压范围为 -0.1~8 V, RS 为 8~-0.1 V, 扫描速率设定为 0.15 V·s⁻¹。考虑到电激活过程中电场作用可能引入额外热效应, 在每次 *J-V* 测试前均通过温控装置将组件温度稳定控制在 25 °C, 以排除温度波动对性能演化的影响。图 2(b) 展示了不同正向偏置电压条件下组件效率随激活时间的演变过程。其中, Control 表示每次的 *J-V* 测试经历约 17 s 的光照及正反向电压扫描。结果表明, 单纯的 *J-V* 测试过程中效率随时间变化幅度较小, 对效率提升贡献有限。相比之下, 施加正向偏置后组件效率均表现出明显的激活行为, 且激活速率和最终效率水平对偏置电压高度敏感。在较高偏置电压 12.5 V 条件

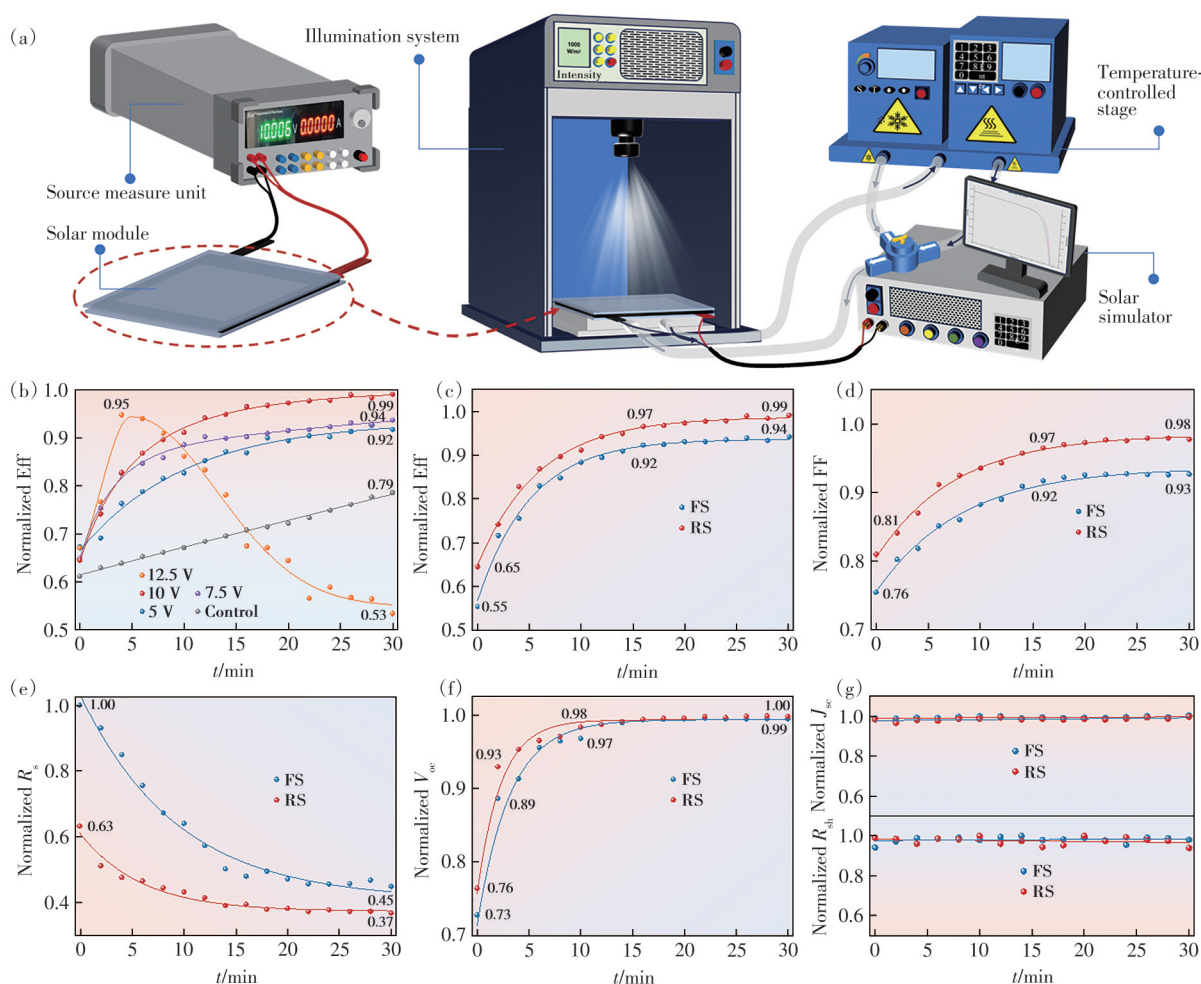


图2 电池组件电激活测试方法及不同偏置电压下的性能演变。(a)电激活与性能测试装置示意图;(b)不同正向偏置电压下组件效率的激活演变过程;(c)~(f)10 V正向偏置电激活条件下组件效率(Efficiency, Eff)、填充因子(Fill factor, FF)、串联电阻(Series resistance, R_s)与开路电压(Open-circuit voltage, V_{oc})的演变;(g)短路电流密度(Short-circuit current density, J_{sc})和并联电阻(Shunt resistance, R_{sh})在电激活过程中的变化

Fig.2 Electrical activation protocol and performance evolution of the perovskite solar modules under different forward biases. (a)Schematic illustration of the electrical activation and measurement setup. (b)Efficiency evolution under different forward bias voltages. (c)~(f)Temporal evolution of the module efficiency (Eff), fill factor (FF), series resistance (R_s), and open-circuit voltage (V_{oc}) under a forward-bias electrical activation of 10 V. (g)Evolution of the short-circuit current density (J_{sc}) and shunt resistance (R_{sh}) during the electrical activation process

下,组件效率在前4 min内迅速提升至最大效率的约95%,表现出极快的激活过程;然而,随着激活时间进一步延长,效率出现显著衰减,在30 min时仅保留最高效率的约53%。相比之下,10 V正向偏置在激活速率与稳定性之间表现出更优的平衡:其前4 min的效率提升速度与7.5 V条件接近,但在较长激活时间下维持了更高的效率水平,30 min时效率可达最大效率的99%。7.5 V和5 V偏置下组件效率同样随时间提升,但激活程度相对有限,最终效率分别为94%和92%。上述结果表明,过高或过低的偏置电压均不利于获得稳定且充分的电激活效果。

基于上述比较,选取10 V作为最优激活电压,进一步分析组件关键性能参数随激活时间的演变规律。图2(c)显示,在10 V偏置条件下,组件效率(Efficiency, Eff)由初始的约65%持续提升,在16 min时达到97%,并在30 min时接近稳定值(99%)。与效率变化趋势一致,填充因子(Fill factor, FF)(图2(d))由初始的81%显著提升,在16 min和30 min时分别达到97%和98%,表明器件内部电荷输运过程逐步得到改善。进一步地,串联电阻(Series resistance, R_s)的演变如图2(e)所示。初始状态下,FS和RS对应的 R_s 分别归一化为100%和63%。随着电激活时间的增加,二者

均持续下降,在 30 min 后分别降至 45% 和 37%,反映出串联损耗明显减小。与此同时,开路电压(Open-circuit voltage, V_{oc}) (图 2(f)) 在激活初期迅速提升,前 4 min 内由 76% 提升至 93%,并在约 10 min 后接近稳定值(98%),显示界面复合损失得到有效抑制。相比之下,短路电流密度(Short-circuit current density, J_{sc}) 及并联电阻(Shunt resistance, R_{sh}) 在整个电激活过程中基本保持不变(图 2(g)),

表明正向电压偏置主要影响器件的载流子输运和界面电学特性,而对光生载流子产生过程及并联泄漏通道影响有限。

3.2 正向偏置下组件温度演化特征

为明确不同正向偏置条件下电激活过程中温度演变的内在机理,进一步对连续施加正向电压时电池组件的温度变化进行了系统记录,其结果如图 3 所示。通过对比不同偏压条件下的温度响

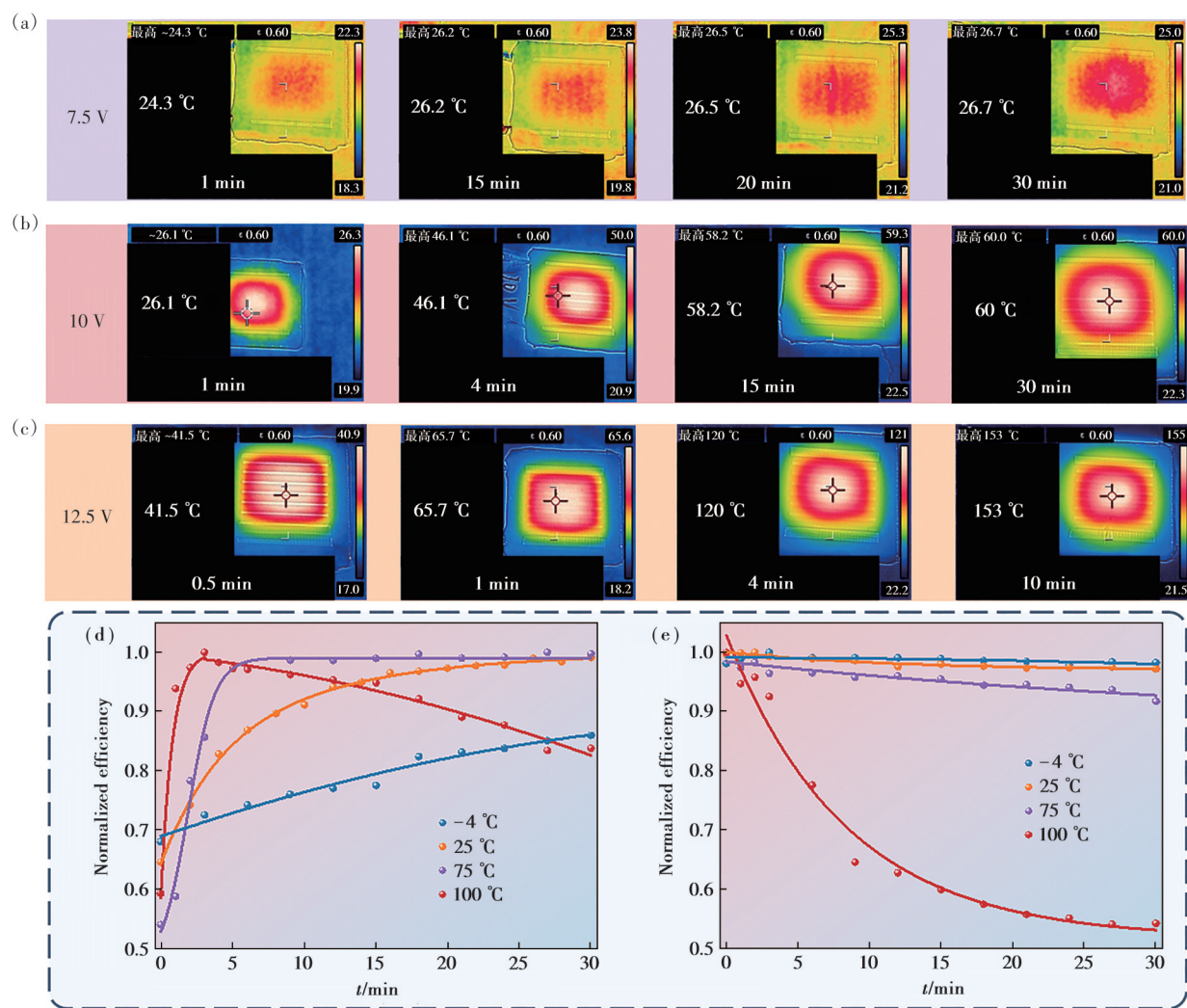


图 3 正向偏置电压下电池组件的温度效应。(a)7.5 V 正向偏置电激活过程中组件温度随时间的变化;(b)10 V 正向偏置电激活条件下组件温度的演变;(c)12.5 V 正向偏置电激活过程中组件温度的快速升高及器件失效现象;(d)不同环境温度下(100 °C、75 °C、25 °C 与 -4 °C)在 10 V 正向偏置条件下钙钛矿电池组件效率随电激活时间的演化;(e)电激活完成后,将组件分别置于不同环境温度(100 °C、75 °C、25 °C 与 -4 °C)下的退激活过程中,组件归一化效率随闲置时间的演化

Fig.3 Temperature evolution of the perovskite solar modules under continuous forward bias voltages. (a)Temperature evolution of the modules under 5 V and 7.5 V forward bias during electrical activation. (b)Temperature evolution under 10 V forward bias. (c)Rapid temperature rise accompanied by device failure under 12.5 V forward bias. (d)Efficiency evolution of perovskite solar modules during electrical activation under a forward bias of 10 V at different ambient temperatures (100 °C, 75 °C, 25 °C and -4 °C). (e)Normalized efficiency evolution of electrically activated modules during deactivation when stored at different ambient temperatures (100 °C, 75 °C, 25 °C and -4 °C)

应特征,可以直接揭示电激活过程中电-热耦合行为电压依赖性及其对器件稳定性的约束作用。如图3(a)所示,在较低正向偏压(5 V与7.5 V)条件下,电池在连续激活30 min内温度仅由24 °C缓慢上升至约26.7 °C,整体温升幅度不足3 °C,且随时间变化极为平缓。这一结果表明,在低偏压区间内,器件中的焦耳热功率较小,体系产生的热量可被环境与封装结构有效耗散,电-热过程基本处于准稳态平衡状态。在该条件下,温度并非限制电激活过程的主导因素,激活动力主要受电场强度本身所约束,这也与图2中低偏压条件下激活速率有限的实验结果相一致。

当偏压提高至10 V时,器件的温度演变行为发生明显改变,如图3(b)所示。通电初期1 min内,电池温度仅轻微升至26.1 °C,表明体系尚未进入显著的热积累阶段;然而,在随后的数分钟内,温度迅速上升,在4 min时达到46.1 °C。这一阶段对应电池内部载流子输运增强、串联电阻相关焦耳热显著增加的过程。值得注意的是,随着激活时间进一步延长,温升速率逐渐降低,在约15 min时温度达到58.2 °C后趋于稳定,并在30 min时维持在约60 °C。这种“先快后慢”的温度演变特征表明,在10 V偏压下,器件内部的发热功率与热耗散能力逐步达到新的动态平衡状态,从而避免了温度持续累积。这一稳定的中等温升区间为电激活过程提供了有利条件,使器件在不引发热失效的前提下实现高效激活。

相比之下,当正向偏压进一步提高至12.5 V时,电池温度表现出显著失控特征,如图3(c)所示。在通电仅0.5 min时温度便迅速升至41.5 °C,1 min内达到65.7 °C,随后温度继续以极高的速率上升,在4 min时已高达120 °C。此后,温度仍未出现饱和迹象,在10 min时进一步升至153 °C,并伴随前板玻璃破裂等结构性失效现象。该过程表明,在高偏压条件下,器件内部焦耳热的产生速率远高于体系的散热能力,导致热量持续积累并最终引发热失效。这种不可逆的温度失控过程为图4中观察到的组件局部损伤与效率急剧衰减提供了直接的热学基础。综合图3(a)~(c)的对比分析可以看出,电激活过程中的温度演变高度依赖于施加的正向偏压水平:低偏压下温升可忽略,中等偏压下形成稳定的热平衡窗口,而过高偏压则引发严重的热失控与结构破坏。因此,温度演

变不仅是电激活过程的伴随结果,更构成限定有效激活电压窗口的关键物理约束。

为进一步明确温度在电激活与退激活过程中的作用机制,我们在10 V正向偏置条件下,对组件在不同环境温度(100 °C、75 °C、25 °C与-4 °C)中的激活与退激活行为进行了对比研究,其结果分别如图3(d)、(e)所示。在高温(100 °C)条件下,组件在激活初期表现出最快的效率提升速率,并在约3 min内达到最大效率,但随后效率持续下降,表明过高温度会在加速离子迁移与界面重构的同时,诱发不可逆的热损伤过程。相比之下,75 °C条件下组件在约6 min达到效率最大值,并在30 min激活过程中保持稳定,显示中等温度有利于在避免热失控的前提下实现充分而稳定的电激活。当环境温度降低至25 °C时,激活速率明显减缓,但器件性能保持稳定;而在-4 °C条件下,激活过程受到显著抑制,30 min后效率仅达到最大值的约85%,说明低温限制了电场驱动离子迁移与界面重构的动力学过程。

相应的退激活实验(图3(e))进一步表明,高温会显著加速性能回退:在100 °C环境中,组件效率在30 min内衰减至峰值的约54%,而在-4 °C条件下,30 min后仍可保持约98%的激活效率,说明低温限制了电场驱动离子迁移与界面重构的动力学过程。高温环境显著加速性能回退,而低温可有效延缓退激活过程。这些结果共同表明,电激活是一种强烈受温度调制的电-热耦合过程,中等温度窗口有利于稳定激活态的建立与维持。

3.3 正向偏置诱导的发光均匀性演化

为进一步从空间分布尺度揭示不同正向偏置电激活过程中器件内部载流子复合均匀性及潜在失效行为,对电池组件在恒流20 mA条件下进行了电致发光(Electroluminescence, EL)成像表征,其结果如图4所示。EL强度与均匀性的演变可直接反映器件内部电学状态的改善程度及局部退化的发生位置,是判定电激活有效性与安全边界的重要依据。

在较低偏压条件下,器件EL响应呈现出稳定而渐进的改善过程。如图4(a)所示,当施加7.5 V正向电压时,电池组件在通电2 min内由初始暗态迅速转为基本全亮,仅在左下角局部区域仍可观察到轻微亮度不足的阴影。这一非均匀区域在随后

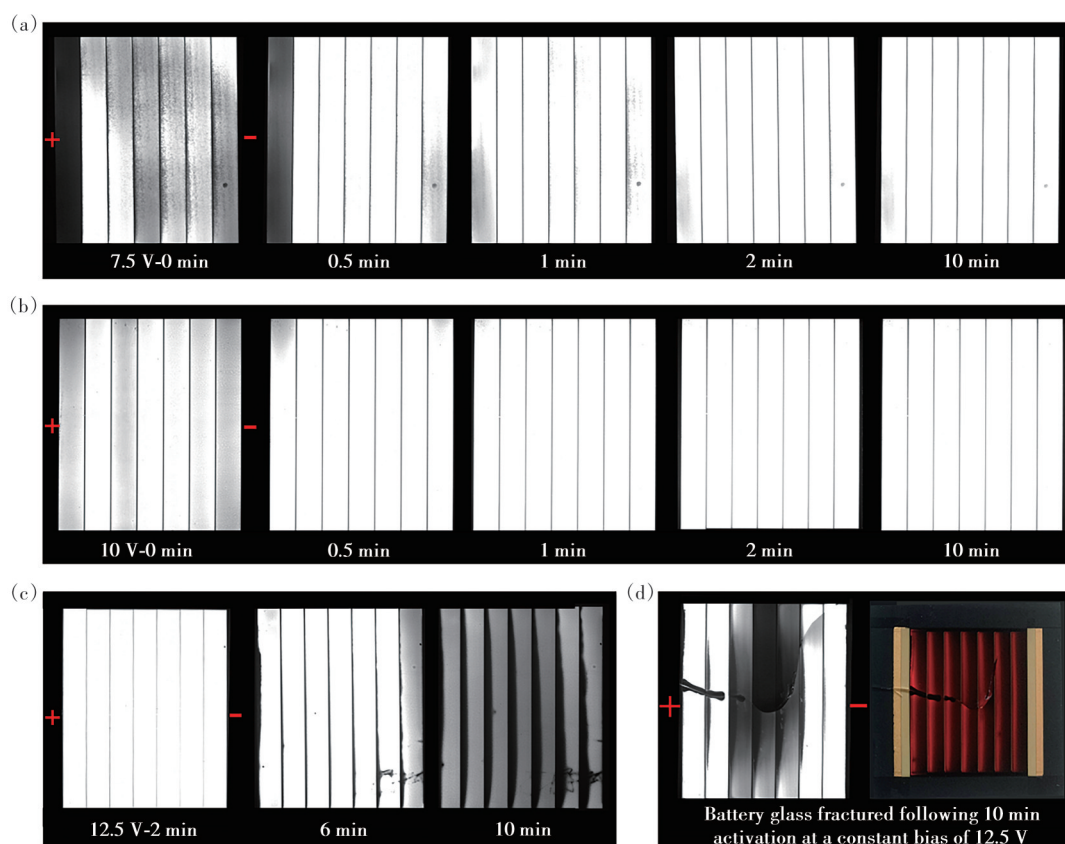


图 4 不同正向偏置电压条件下电池组件的电致发光(Electroluminescence, EL)表征。(a)在 20 mA 恒流条件下,7.5 V 正向偏置电激活过程中组件 EL 图像的演变;(b)10 V 正向偏置电激活过程中组件 EL 图像的演变;(c)间歇施加 12.5 V 正向偏置电激活过程中组件 EL 图像的演变;(d)连续施加 12.5 V 正向偏置电激活 10 min 后组件的 EL 图像

Fig.4 Electroluminescence (EL) characterization of the perovskite solar modules under different forward bias voltages. (a) Evolution of EL images of the modules under 7.5 V forward bias during electrical activation at a constant current of 20 mA. (b) EL image evolution under 10 V forward bias. (c) EL image evolution under intermittent 12.5 V forward bias activation. (d) EL image of the module after continuous 12.5 V forward bias activation for 10 min

的激活过程中逐步减弱,至 10 min 时基本消失,组件整体呈现出均匀连续的发光分布。该结果表明,在 7.5 V 条件下,电激活主要促进了组件内部电流分布与载流子复合均匀性的逐步建立,而未引入明显的局部损伤或异常发热区域。当偏压提升至 10 V 时,器件 EL 行为进一步优化,如图 4(b) 所示。组件在 2 min 内即可实现完全均匀的高强度发光,且在持续激活至 10 min 的过程中未观察到任何亮度衰减或暗区产生。结合图 3 中 10 V 条件下温度趋于稳定的结果,可以推断此时器件内部已建立起兼顾高电场驱动与可控热积累的平衡状态,使载流子输运与辐射复合过程在整个组件尺度上同步改善,从而实现高效且无损伤的电激活。相比之下,在更高正向偏压(12.5 V)下,EL 成像揭示出明显不同的演化行为。如图 4(c) 所示,在累计激活 2 min 时,组件仍保持明亮且均匀

的 EL 分布,未出现可见损伤,说明高偏压初期同样能够快速增强载流子注入与复合。然而,当激活时间延长至 6 min 后,局部暗区开始显现,且缺陷首先出现在每个子电池中靠近组件正极一侧的位置。随着激活时间增加至 10 min,暗区迅速扩展,组件中多个子电池发生明显退化,其中靠近组件负极一侧的子电池损伤最为严重,局部暗区面积已超过单节电池的一半,对应器件效率已下降至峰值的约 85%。这一空间非均匀退化现象表明,在高偏压条件下,串联结构中不同子电池承受的电场与热负载并不一致,从而放大了局部失效风险。

为进一步排除间歇断电对损伤形态的影响,图 4(d)展示了在 12.5 V 连续不间断施加 10 min 条件下的 EL 表征结果。可以观察到,组件中各子电池的损伤均起始于靠近组件正极一侧,但退化

程度在空间上呈现显著非均匀性,其中位于组件中部的第3,4,5个子电池退化最为严重。该现象表明,高正向偏置下的失效行为主要受空间热场分布调控。在串联结构中,各子电池承受相同电流密度,焦耳热的产生受局部电阻与散热条件限制,相较于边缘区域,组件中部子电池因热扩散受限更易产生热积累,从而形成较高的局部温度。升高的温度进一步加速离子迁移与界面电化学反应,诱发缺陷生成与非辐射复合增强,最终导致电致发光衰减及性能不可逆退化。因此,高偏压条件下组件中心区域因热积累效应而率先发生失效,凸显了热管理在钙钛矿组件电激活与稳定性调控中的关键作用。

综上所述,图4的EL成像结果从空间维度清晰地揭示了电激活过程的“安全窗口”特征:中低偏压(7.5~10 V)能够在不引入局部失效的前提下显著改善器件的载流子复合均匀性,而过高偏压(12.5 V)虽可在短时间内增强EL强度,却会迅速诱发空间非均匀退化并导致性能不可逆衰减。这一结论与前述温度演变规律(图3)相互印证,共同限定了电激活过程的合理操作区间。

4 结 论

本文系统研究了正向偏压电激活对大面积钙钛矿电池组件性能演化、温度响应及空间均匀性的影响规律。结果表明,正向偏压对钙钛矿组件的激活,其物理本质是通过电场驱动界面离子与电荷重分布,优化能带对齐,从而降低非辐射复合损失和串联电阻。这直接表现为填充因子与开路电压的协同提升。电致发光成像作为关键的空间分辨诊断工具,直观证实:适中偏压(10 V)下组件发光均匀性显著增强,印证了体相与界面缺陷的有效钝化;而高偏压(≥ 12.5 V)下,严重的热效应会触发不可逆的降解链式反应,如离子聚集、材料分解,并在发光图像中表现为从高电场区域正极侧产生的局部暗区。本研究不仅界定了一个安全高效的电激活电压窗口,还为理解并解决大面积钙钛矿光电器件的性能不稳定问题提供了理论基础和实践指导。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260006>

参 考 文 献:

- [1] LIU X A, ZHANG J H, WANG B C, *et al.* Perovskite solar modules with high efficiency exceeding 20%: From laboratory to industrial community [J]. *Joule*, 2025, 9(9): 102056.
- [2] PARK N G, ZHU K. Scalable fabrication and coating methods for perovskite solar cells and solar modules [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2020, 5(5): 333-350.
- [3] 魏静, 王秋雯, 孙相成, 等. 准二维钙钛矿太阳能电池的研究进展 [J]. 中国光学, 2021, 14(1): 100-116.
WEI J, WANG Q W, SUN X Y, *et al.* Research progress of quasi-two-dimensional perovskite solar cells [J]. *Chin. Opt.*, 2021, 14(1): 100-116. (in Chinese)
- [4] 于超, 陈琛, 吴丹, 等. 喷墨打印钙钛矿光电器件的研究进展 [J]. 液晶与显示, 2021, 36(1): 158-175.
YU C, CHEN C, WU D, *et al.* Research progress of inkjet printed perovskite optoelectronic devices [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(1): 158-175. (in Chinese)
- [5] RIETWYK K J, TAN B E, SURMIAK A, *et al.* Light intensity modulated photoluminescence for rapid series resistance mapping of perovskite solar cells [J]. *Nano Energy*, 2020, 73: 104755.
- [6] HENDERSON C, LUKE J, BICALHO I S, *et al.* Charge transfer complex formation between organic interlayers drives light-soaking in large area perovskite solar cells [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2023, 16(12): 5891-5903.
- [7] HISHIKAWA Y, AZUMA K, TAMURA K, *et al.* Effects of bias voltage application and light soaking on the performance of flexible perovskite photovoltaic modules [J]. *Sol. Energy*, 2025, 302: 114009.
- [8] 王静, 高姗, 段香梅, 等. 钙钛矿太阳能电池材料缺陷对器件性能与稳定性的影响 [J]. 物理学报, 2024, 73(6): 063101.
WANG J, GAO S, DUAN X M, *et al.* Influence of defect in perovskite solar cell materials on device performance and stability [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2024, 73(6): 063101. (in Chinese)
- [9] HU J G, GOTTESMAN R, GOUDA L, *et al.* Photovoltage behavior in perovskite solar cells under light-soaking showing

- photoinduced interfacial changes [J]. *ACS Energy Lett.*, 2017, 2(5): 950-956.
- [10] KHENKIN M, KÖBLER H, REMEC M, *et al.* Light cycling as a key to understanding the outdoor behaviour of perovskite solar cells [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2024, 17(2): 602-610.
- [11] SAMU G F, JANÁKY C, KAMAT P V. A victim of halide ion segregation. How light soaking affects solar cell performance of mixed halide lead perovskites [J]. *ACS Energy Lett.*, 2017, 2(8): 1860-1861.
- [12] ZHAO C, CHEN B B, QIAO X F, *et al.* Revealing underlying processes involved in light soaking effects and hysteresis phenomena in perovskite solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2015, 5(14): 1500279.
- [13] ALBERTI A, VALASTRO S, NONNI E, *et al.* Resilience to demixing and phase segregation in perovskite solar cells under light-dark cycles and temperature [J]. *ACS Energy Lett.*, 2025, 10(5): 2259-2267.
- [14] SAITO H, YOSHITA M, TOBITA H, *et al.* Round-robin inter-comparison of maximum power measurement for metastable perovskite solar cells [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2022, 11(5): 055008.
- [15] SONG T, FRIEDMAN D J, KOPIDAKIS N. Comprehensive performance calibration guidance for perovskites and other emerging solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2021, 11(23): 2100728.
- [16] TVINGSTEDT K, DEIBEL C. Temperature dependence of ideality factors in organic solar cells and the relation to radiative efficiency [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2016, 6(9): 1502230.
- [17] LI N X, SHI Z F, FEI C B, *et al.* Barrier reinforcement for enhanced perovskite solar cell stability under reverse bias [J]. *Nat. Energy*, 2024, 9(10): 1264-1274.
- [18] WU J H, LI Y S, TAN S, *et al.* Enhanced perovskite solar cell efficiency *via* the electric-field-induced approach [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(24): 27258-27267.
- [19] XU P, WANG P F, WANG M H, *et al.* Grain boundaries contribute to the performance of perovskite solar cells by promoting charge separations [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2025, 17(1): 285.
- [20] YANTARA N, MATHEWS N. Toolsets for assessing ionic migration in halide perovskites [J]. *Joule*, 2024, 8(5): 1239-1273.
- [21] 郑志江, 王仁杰, 黄少彪, 等. 正向偏置电压修复钙钛矿太阳能电池的研究 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45(4): 59-64.
- ZHENG Z J, WANG R J, HUANG S B, *et al.* Investigation of repairing perovskite solar cells *via* forward bias voltage [J]. *Acta Energ. Sol. Sinica*, 2024, 45(4): 59-64. (in Chinese)
- [22] HUANG K Q, FENG X X, LI H Y, *et al.* Manipulating the migration of iodine ions *via* reverse-biasing for boosting photovoltaic performance of perovskite solar cells [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(35): 2204163.
- [23] 温宏炎, 匡中付, 曾鹏, 等. 钙钛矿太阳能电池大面积制备研究综述 [J]. *云南化工*, 2025, 52(12): 35-40.
- WEN H Y, KUANG Z F, ZENG P, *et al.* Research review on large-area preparation of perovskite solar cells [J]. *Yunnan Chem. Technol.*, 2025, 52(12): 35-40. (in Chinese)
- [24] 许振桐, 林杰, HUANG JINGSONG, 等. 大面积钙钛矿太阳能电池薄膜制备工艺进展综述 [J]. *发光学报*, 2025, 46(1): 98-109.
- XU Z T, LIN J, HUANG J S, *et al.* Review of advances in large-area perovskite solar cell thin-film fabrication techniques [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(1): 98-109. (in Chinese)
- [25] WALI Q, RABBANI N A, AFRIN S, *et al.* Advances in thin layer deposition techniques in perovskite solar cells [J]. *RSC Adv.*, 2025, 15(48): 40286-40298.
- [26] PENG C C, YAO H T, ALI O, *et al.* Weakly space-confined all-inorganic perovskites for light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2025, 643(8070): 96-103.
- [27] AYDIN E. Raising the bar for breakdown [J]. *Nat. Energy*, 2024, 9(10): 1183-1184.
- [28] ERDIL U, KHENKIN M, REMEC M, *et al.* Mimicking outdoor ion migration in perovskite solar cells: a forward bias, no-light accelerated aging approach [J]. *ACS Energy Lett.*, 2025, 10(3): 1529-1537.
- [29] WANG T, ZHANG Y, KONG W Y, *et al.* Transporting holes stably under iodide invasion in efficient perovskite solar cells [J]. *Science*, 2022, 377(6611): 1227-1232.
- [30] ZHAN C L, LUO C, GAO F, *et al.* Unraveling the operation degradation mechanism of positive bias interface in perovskite solar cells [J]. *Small*, 2025, 21(29): 2502989.
- [31] ZHAO J Z, CAO J P, DONG J J, *et al.* Impact of lithium dopants in hole-transporting layers on perovskite solar cell stability under day-night cycling [J]. *Nat. Energy*, 2025, 10(10): 1226-1236.
- [32] WU L Y, HU S F, YANG F, *et al.* Resilience pathways for halide perovskite photovoltaics under temperature cycling

- [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2025, 10(7): 536-549.
- [33] LI G X, ZHANG Z H, AGYEI-TUFFOUR B, *et al.* Stabilizing high-efficiency perovskite solar cells *via* strategic interfacial contact engineering [J]. *Nat. Photonics*, 2026, 20(1): 55-62.
- [34] ZHAO C Y, WANG F F, HU X D, *et al.* Ambient blade-coated perovskite solar cells with high reverse bias stability enabled by polymeric hole transporter design [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 10355.
- [35] KANG B C, YAN F. Emerging strategies for the large-scale fabrication of perovskite solar modules: from design to process [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2025, 18(9): 3917-3954.
- [36] NJEMA G G, KIBET J K, NGARI S M. A review of interface engineering characteristics for high performance perovskite solar cells [J]. *Meas. Energy*, 2024, 2: 100005.
- [37] LIM J, LEE S, SHIM H, *et al.* Efficient charge separation at localized 2D ferroelectric domains in perovskite solar cells [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2025, 18(11): 5287-5297.
- [38] DONG H, QU J S, WANG S Y, *et al.* Suppressing open-circuit voltage loss in perovskite solar cells *via* ligand-assisted crystallization dynamics regulation strategy [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(43): e11111.
- [39] DENG X F, WEN X M, ZHENG J H, *et al.* Dynamic study of the light soaking effect on perovskite solar cells by *in-situ* photoluminescence microscopy [J]. *Nano Energy*, 2018, 46: 356-364.
- [40] HENZEL J, BAKKER K, NAJAFI M, *et al.* Impact of the current on reverse bias degradation of perovskite solar cells [J]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2023, 6(22): 11429-11432.
- [41] LAN Z N, YANG Y Y, HUANG H, *et al.* Interfacial electrostatic repulsion inhibits iodide ion migration for enhancing reverse-bias stability of perovskite solar cells [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 11407.
- [42] LI W, ZHANG J J, ZENG L, *et al.* Efficient perovskite/Cu(In,Ga)Se₂ tandem solar cells with a composite intermediate recombination layer [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 17(1): 711.
- [43] ZHAO Y C, MIAO P, ELIA J, *et al.* Strain-activated light-induced halide segregation in mixed-halide perovskite solids [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 6328.
- [44] REMEC M, TOMŠIČ Š, KHENKIN M, *et al.* From sunrise to sunset: unraveling metastability in perovskite solar cells by coupled outdoor testing and energy yield modelling [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2024, 14(29): 2304452.
- [45] XU H Y, XIAO Y, ELMESTEKAWY K A, *et al.* Metastable interphase induced pre-strain compensation enables efficient and stable perovskite solar cells [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2025, 18(1): 246-255.
- [46] PICA G, PANCINI L, PETOUKHOFF C E, *et al.* Photo-ferroelectric perovskite interfaces for boosting V_{OC} in efficient perovskite solar cells [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 8753.
- [47] MOTTI S G, MEGGIOLARO D, BARKER A J, *et al.* Controlling competing photochemical reactions stabilizes perovskite solar cells [J]. *Nat. Photonics*, 2019, 13(8): 532-539.
- [48] LEIJTENS T, BUSH K, CHEACHAROEN R, *et al.* Towards enabling stable lead halide perovskite solar cells; interplay between structural, environmental, and thermal stability [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5(23): 11483-11500.
- [49] TORMENA N, CARIA A, BUFFOLO M, *et al.* Recoverable degradation of FAPbBr₃ perovskite solar cells under reverse-bias: a combined electro-optical investigation [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2025, 285: 113547.
- [50] 王松, 侯有政, 张帆, 等. 钙钛矿太阳能电池中钝化层对缺陷复合行为的影响 [J]. *发光学报*, 2021, 42(7): 1029-1039. WANG S, HOU Y Z, ZHANG F, *et al.* Effect of passivation layer on trap assisted recombination in inverted perovskite solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(7): 1029-1039. (in Chinese)
- [51] 陈捷达, 李东栋, 朱绪飞, 等. 柔性钙钛矿电池的机械稳定性提升策略 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(19): 2332-2352. CHEN J D, LI D D, ZHU X F, *et al.* Strategy of improving mechanical stability of flexible perovskite solar cells [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(19): 2332-2352. (in Chinese)



肖泽(1999-),男,广东吴川人,硕士研究生,2022年于佛山大学获得学士学位,主要从事器件仿真与新型钙钛矿太阳能电池的相关研究。
E-mail: 3194770668@qq.com



麦耀华(1976-),男,广东化州人,博士,教授,博士生导师,2006年于德国于利希研究中心光伏研究所获得博士学位,主要从事新能源材料与器件、高效率钙钛矿太阳能电池等研究。
E-mail: yaohuamai@jnu.edu.cn