



商用钙钛矿光伏组件的绿色环保制造

王银科, 肖科*, 谭海仁*

南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 现代工程与应用科学学院, 关键地球物质循环前沿科学中心, 南京 210023

* 联系人, E-mail: kexiao@smail.nju.edu.cn; hairentan@nju.edu.cn

Green manufacturing of commercially viable perovskite photovoltaic modules

Yinke Wang, Ke Xiao* & Hairen Tan*

National Laboratory of Solid State Microstructures, College of Engineering and Applied Sciences, Frontiers Science Center for Critical Earth Material Cycling, Nanjing University, Nanjing 210023, China

* Corresponding authors, E-mail: kexiao@smail.nju.edu.cn; hairentan@nju.edu.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-5943](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5943)

钙钛矿光伏^[1,2]具有潜在的低生产成本、高能量转换效率与可规模化制造优势, 但实现商业化部署仍需同步满足绿色制造、组件级功率输出与长期可靠性等要求^[3-5]. 当前产业化瓶颈主要集中在三个方面: 其一, 许多高性能钙钛矿组分(尤其是FA-Cs体系)在制备中仍依赖2-甲氧基乙醇(2-ME)、N, N-二甲基甲酰胺(DMF)和N-甲基吡咯烷酮(NMP)等危险溶剂, 尽管二甲基亚砜(DMSO)属于绿色溶剂, 但通常仍与DMF搭配使用, 当DMSO占比过高时会导致不利的中间相动力学并抑制成核、增强配位, 从而造成界面黏附力不足出现剥离的现象, 限制了环境空气兼容的绿色溶剂体系开发. 因此, 构建能够在环境空气条件下稳定运行并适配规模化涂布工艺的绿色溶剂体系, 是商业尺度制造的关键未满足需求. 其二, 在钙钛矿薄膜放大制备过程中, 大面积薄膜的均匀性成为决定总面积效率与一致性的核心因素. 狭缝涂布具备平米级高通量沉积能力, 被广泛认为是可行的规模化路线. 但在“涂布-干燥-结晶”的过程中, 工艺窗口会随面积放大而显著收缩, 薄膜厚度、结晶取向与缺陷态的空间分布更难保持一致. 在溶剂干燥过程中, 气-固-液边界处容易发生自发溶剂挥发并触发边缘先行结晶, 形成边缘形貌缺陷与晶化不足, 从而削弱大面积组件的全面积性能并降低可重复性. 其三, 钙钛矿组件通常要求在行业标准测试下保持稳定, 在大规模并网发电时要求长期运行的稳定. 现有研究在封装与界面工程方面已取得进展, 但组件长期可靠性仍受薄膜本征质量与体相

缺陷控制, 需同时优化溶剂化学与动力学以提升薄膜本征质量. 同时, 面向真实应用, 完成国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)全套测试序列并获得独立第三方验证, 已成为评估钙钛矿组件“可部署性”的必要条件. 综上所述, 我们围绕以上这三大瓶颈问题, 提出并验证了“绿色溶剂体系+大规模制备边缘结晶调控”的一体化路径, 旨在让钙钛矿组件在环境友好、可规模制造与可靠性标准方面同时达标^[6-8].

在溶剂体系方面, 我们设计了以 γ -戊内酯(GVL)/DMSO/2-甲基四氢呋喃(2-MeTHF)构成的绿色溶剂墨水, 从配位化学和挥发动力学两条主线同时调控成膜过程^[9]. GVL提供对前驱体的良好溶解与配位环境, DMSO用于稳定中间相并抑制无序快速结晶, 而2-MeTHF则通过改变体系挥发行为与溶剂-前驱体相互作用, 协同优化成核与晶体生长. 一方面, 引入2-MeTHF会显著降低GVL体系的沸点、增强整体挥发性. 另一方面, 2-MeTHF还能削弱钙钛矿与GVL的配位作用(图1(a)), 促进在后续抽真空辅助结晶与退火中更有效的溶剂挥发, 解决了GVL/DMSO溶剂体系出现的薄膜剥离问题(图1(b)), 从而获得相纯度更高、结晶质量更好的薄膜. 在这里, 我们通过溶解度和薄膜表征实验结果确定对于 $\text{FA}_{0.95}\text{Cs}_{0.05}\text{PbI}_3$ 钙钛矿溶液, 最佳溶剂比例为2-MeTHF:GVL:DMSO=5:4:1(v:v:v, 0.6 mmol/mL). 将前驱体溶液在室温下搅拌至少1小时, 然后通过0.22 μm 聚四氟乙烯(PTFE)膜过滤后

引用格式: 王银科, 肖科, 谭海仁. 商用钙钛矿光伏组件的绿色环保制造. 科学通报, 2026, 71: 2554-2556

Wang Y, Xiao K, Tan H. Green manufacturing of commercially viable perovskite photovoltaic modules (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2554-2556, doi: [10.1360/CSB-2025-5943](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5943)

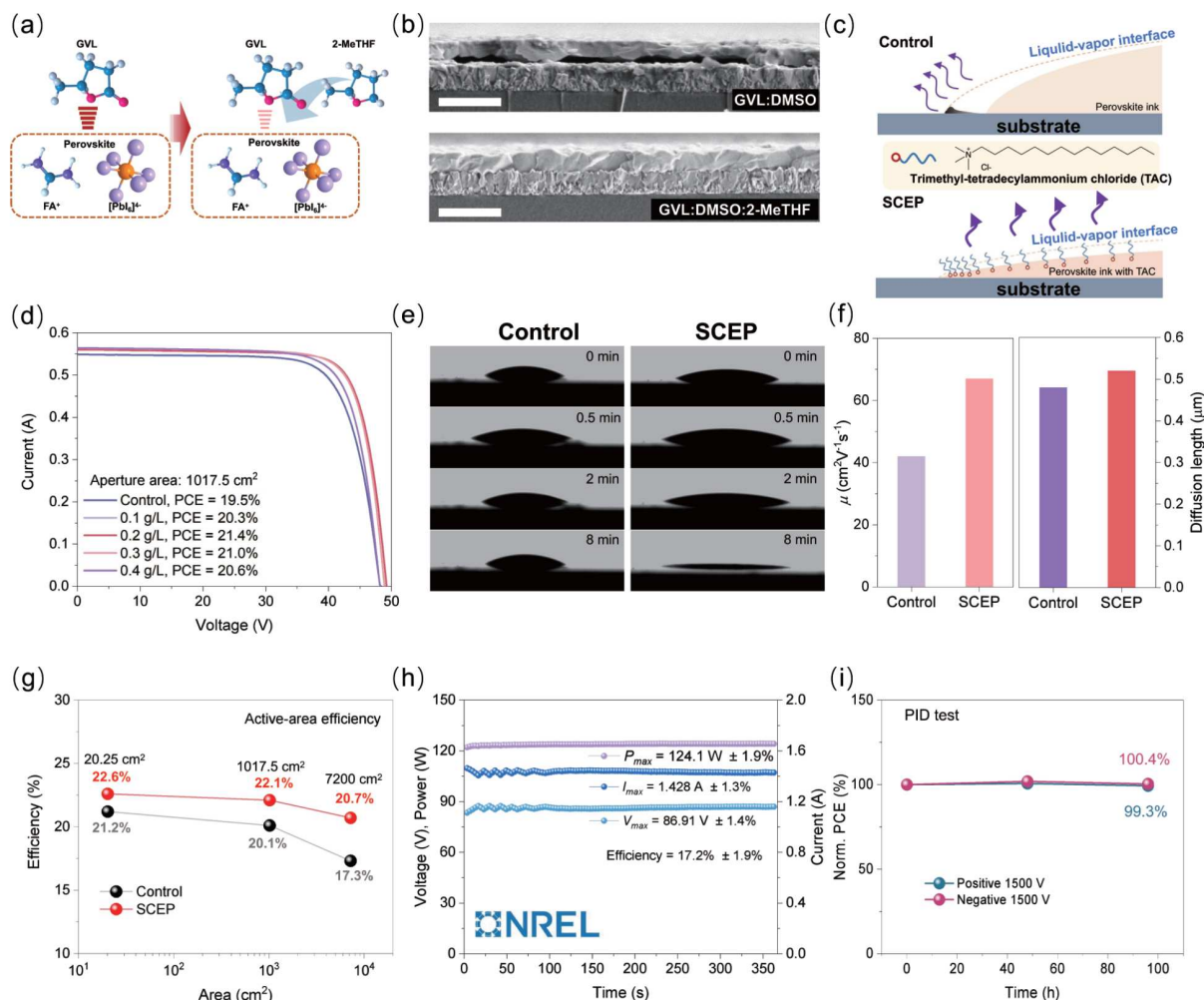


图 1 (网络版彩色)改进型溶剂体系用于实现具有商业可行性的钙钛矿光伏组件的结果^[9]。(a) GVL与2-MeTHF对钙钛矿的作用示意图。(b) 截面扫描电子显微镜图: 由GVL/DMSO(上图)与GVL/DMSO/2-MeTHF混合溶剂(下图)制备的钙钛矿薄膜。比例尺均为1 μm。(c) 钙钛矿湿膜的溶剂挥发过程示意图。(d) TAC浓度为0~0.4 g/L时, 孔径面积为1017.5 cm²的钙钛矿组件的最优J-V曲线。(e) 对照组与SCEP钙钛矿墨水液滴的接触角图像。(f) 基于太赫兹分析的对照组与SCEP钙钛矿薄膜的载流子迁移率(左)及扩散长度(右)。(g) 冠军组件在20.25、1017.5与7200 cm²面积下的有效面积效率对比。(h) 组件在360 s内的NREL认证稳态 $P_{\max}$ 、 $I_{\max}$ 与 $V_{\max}$ 曲线。(i) 由仁烁光能(苏州)有限公司制备的商业尺寸钙钛矿光伏组件的IEC认证的PID测试结果。Copyright © 2025, The American Association for the Advancement of Science

Figure 1 (Color online) Results of improved solvent systems for commercially viable perovskite photovoltaic modules^[9]. (a) Schematic showing coordination of GVL and 2-MeTHF to perovskite. (b) Cross-sectional SEM (scanning electron microscope) of the perovskite films fabricated from GVL/DMSO (top panel) and GVL/DMSO/2-MeTHF mixtures (bottom panel). The scale bars represent a length of 1 μm. (c) Schematic illustrating solvent evaporation of the perovskite wet film. (d) Champion J-V curves of the perovskite modules (aperture area: 1017.5 cm²) with TAC concentration of 0–0.4 g/L. (e) Contact-angle images of the control and SCEP perovskite ink droplets. (f) Mobilities (left) and diffusion lengths (right) of the control and SCEP perovskite films based on terahertz analysis. (g) Comparison of active-area efficiencies between the champion 20.25-, 1017.5-, and 7200-cm² modules. (h) NREL-certified stabilized $P_{\max}$, $I_{\max}$, and $V_{\max}$ plots within 360 s for a module. (i) PID test (TÜV Rheinland certification) of commercial-scale perovskite modules fabricated by Renshine Solar (Suzhou) Co., Ltd. Copyright © 2025, The American Association for the Advancement of Science

进行薄膜沉积。

然而, 挥发性提升在带来快速成膜窗口的同时, 也会诱发大面积涂布时典型的“边缘效应”问题: 当湿膜处于气-固-液三相边界附近时, 溶剂的自挥发会率先触发边缘结晶, 使边缘晶粒与缺陷态分布劣化, 进而降低组件的效率, 并成为后续性能衰减的起点。针对这一难点, 我们提出溶剂限域边

缘保护(solvent-confinement edge-protection, SCEP)策略, 在钙钛矿前驱体溶液中引入表面活性分子十四烷基三甲基氯化铵(trimethyltetradecylammonium chloride, TAC)。其自组装将疏水基团朝向空气, TAC分子通过表面活性剂诱导的马兰戈尼效应平衡了从墨滴表面到墨滴主体的溶液流动, 从而在大面积薄膜边缘形成均匀区域。该现象还延缓了气-液-固三

相界面的溶剂挥发(图1(c)). 在这里, 我们通过组件实验结果确定对于该绿色溶剂体系 $\text{FA}_{0.95}\text{Cs}_{0.05}\text{PbI}_3$ 钙钛矿溶液, 最佳TAC浓度为0.2 mg/mL(图1(d)). 此外, 通过接触角测试发现, 在FTO/ NiO_x 基底上, 加入TAC的钙钛矿液滴的初始接触角低于对照组, 表明TAC降低了表面张力(图1(e)). 在液滴沉积初期, 固液界面的润湿作用主导了溶剂蒸发过程. 随着固液界面逐渐稳定, 主导机制转变为液-气界面的溶剂蒸发. 由于对照组液滴边缘的快速蒸发, 溶液浓度在周边逐渐增加, 导致接触角增大. 相比之下, 含TAC的液滴表现出边缘蒸发抑制现象, 表明整个气液界面的溶剂挥发均匀且接触角逐步减小(图1(e)). 总的来说, SCEP策略是利用该分子自组装调节表面张力与局部流场, 抑制边缘处过快挥发, 平衡液面与体相的物质传输, 让边缘区域也能获得与中心一致的结晶动力学, 最终实现均匀高质量的大面积薄膜制备.

得益于SCEP对边缘挥发与结晶的均一化调控, 我们在30 cm×40 cm基底上获得了更稳定的载流子性质. 为验证SCEP策略对钙钛矿薄膜中载流子迁移率和扩散长度的影响, 我们采用飞秒分辨的光泵太赫兹探测光谱技术, 计算出对照样品和SCEP样品的电荷载流子迁移率分别为42和67 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. 太赫兹时间分辨光谱显示, 与对照膜的0.48 μm 相比, SCEP膜的载流子寿命更长, 增加0.54 μm (图1(f)). 这些结果表明了缺陷复合的降低与薄膜质量的提升.

在组件层面, 我们采用FTO/ NiO_x /钙钛矿/C60/ SnO_2 /Cu结构. 首先, 使用HAN'S激光器(27 W, 1064 nm, 40 kHz)在FTO玻璃基板上刻划P1线. 随后, 基板分别用洗涤剂、去离子水和异丙醇超声清洗20分钟后在干净的基板上通过磁控溅射沉积 NiO_x 层. 之后, 在常温空气中, 将钙钛矿层在环境空气条件下通过狭缝涂布沉积到FTO/ NiO_x 基板上. 在此过程中, 刀头与基板之间的间隙保持在50 μm , 速度为15 mm/s. 将钙钛矿湿膜转移至真空腔体干燥箱(vacuum chamber dryer, VCD)系统中真空处理45秒(10 Pa), 并通入流量为1000 sccm的氮气. 将真空处理后的薄膜在130°C热板上退火10分钟后, 在

130°C的层次炉中加热10分钟以进一步结晶. 然后, 以0.2 A/s的速率在薄膜上蒸镀25 nm的C60, 氧化锡(约15 nm)通过原子层沉积(atomic layer deposition, ALD)设备在75°C下沉积. 接着, 使用HAN'S激光器(2 W, 532 nm, 50 kHz)刻划P2线, 随后在其上热蒸发150 nm的铜电极(1.0 A/s). 最后, 使用与P2刻划相同的参数对P3进行激光刻划. 在此基础上, 于孔径面积为20.25、1017.5 cm^2 的组件上分别实现了21.9%和21.4%的冠军级光电转换效率(photoelectric conversion efficiency, PCE). 最佳性能的7200 cm^2 商业组件在实验室测得全面积效率18.0%, 并获得国际权威NREL认证的稳态全面积效率17.2%(图1(g, h)). 基于不同面积组件的几何填充因子(fill factor, FF), 计算得出其活性面积PCE值分别为22.6%、22.1%和20.7%(图1(g)). 尽管组件面积大幅扩大, 但性能差距微乎其微, 这充分证明了该技术从实验室到商业化光伏组件的可扩展性. 更为关键的是, 围绕光伏产业普遍采用的IEC 61215可靠性测试标准体系, 我们系统评估了组件可靠性, 获得了国际权威的TÜV Rheinland的第三方认证. 其中, 我们评估了电压诱导降解(potential-induced degradation, PID)这一IEC 61215:2021标准新增要求. 对组件施加1500 V的正负高压, 持续时间超过90小时, 结果显示未出现显著降解, 证实该组件能够在光伏电站的高压条件下保持安全、稳定且高效运行(图1(i)). 这一认证不仅验证了我们的组件在长期耐用性、功率输出稳定性及严苛环境适应性方面均满足国际最高标准, 也为钙钛矿光伏的产业化奠定了坚实基础.

综上所述, 我们通过绿色溶剂体系工程化设计, 构建了由GVL、DMSO与2-MeTHF组成的环保型钙钛矿前驱体墨水, 实现对溶剂配位作用与挥发动力学精确调控. 为满足大面积制备需求, 我们引入表面活性剂TAC以均一化溶剂挥发过程并提升结晶一致性, 在商业尺度组件(7200 cm^2)上实现了经NREL权威认证的17.2%稳态输出效率, 并通过TÜV Rheinland认证满足IEC 61215的全套可靠性测试. 该研究为钙钛矿光伏加速迈向产业化部署提供了清晰可行的工程路径.

推荐阅读文献

- 1 Jeon N J, Noh J H, Kim Y C, et al. Solvent engineering for high-performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells. *Nat Mater*, 2014, 13: 897–903
- 2 Yang W S, Noh J H, Jeon N J, et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 2015, 348: 1234–1237
- 3 Meng L, You J, Yang Y. Addressing the stability issue of perovskite solar cells for commercial applications. *Nat Commun*, 2018, 9: 5265
- 4 Li S, Jiang Y, Xu J, et al. High-efficiency and thermally stable FACsPbI₃ perovskite photovoltaics. *Nature*, 2024, 635: 82–88
- 5 Zhu H, Teale S, Lintangpradipto M N, et al. Long-term operating stability in perovskite photovoltaics. *Nat Rev Mater*, 2023, 8: 569–586
- 6 Rong Y, Hu Y, Mei A, et al. Challenges for commercializing perovskite solar cells. *Science*, 2018, 361: eaat8235
- 7 Hu Y, Chu Y, Wang Q, et al. Standardizing perovskite solar modules beyond cells. *Joule*, 2019, 3: 2076–2085
- 8 Snaith H J, Hacke P. Enabling reliability assessments of pre-commercial perovskite photovoltaics with lessons learned from industrial standards. *Nat Energy*, 2018, 3: 459–465
- 9 Wang Y, Liu Y, Luo X, et al. Improved solvent systems for commercially viable perovskite photovoltaic modules. *Science*, 2025, 390: 1021–1028