

晶硅/钙钛矿叠层电池的界面工程进展

杨铁斌

深圳创维光伏科技有限公司, 中国·广东 深圳 518107

摘要: 晶硅/钙钛矿叠层太阳能电池通过串联宽带隙钙钛矿顶电池与窄带隙晶硅底电池, 能够突破单结太阳能电池的肖克利-奎伊瑟效率极限, 被视为下一代光伏技术突破 35% 效率瓶颈的关键路径。然而, 其性能与稳定性严重受制于器件内部复杂的界面问题。本文总结了晶硅/钙钛矿叠层电池中的关键界面工程策略。首先介绍叠层电池的基本结构与主流制备工艺, 以及全纹理硅表面的共形钙钛矿生长挑战。其次重点讨论了互联层/隧道复合结、钙钛矿-硅的下界面(埋底界面)以及钙钛矿-电子传输层的上界面的工程化方案, 涵盖材料选择、钝化机制、工艺兼容性与稳定性提升等方面。最后, 对叠层电池技术发展未来和前景进行展望, 旨在为晶硅/钙钛矿叠层电池发展提供参考。

关键词: 钙钛矿; 太阳能电池; 叠层电池; 界面工程

Progress in Interface Engineering of Crystalline Silicon/Perovskite Layered Batteries

Yang Tiebin

Shenzhen Skyworth PV Technology Co., Ltd., China Guangdong Shenzhen 518107

Abstract: Silicon/perovskite tandem solar cells, combined with low band-gap silicon cell and wide band-gap perovskite cell, hold great potential to overcome the Shockley-Queisser efficiency limit, and are regarded as the key route for next-generation photovoltaic over 35% efficiency. However, their performance and stability are severely constrained by the complex interfaces. Herein, we summarize the key interfacial engineering strategies for silicon/perovskite tandem solar cells. First, the basic structures and fabrication processes of tandem cells are introduced, along with the challenges of conformal perovskite growth on fully textured silicon surfaces. Second, the engineering strategies for the interconnecting layer/tunnel recombination junction, the buried perovskite-silicon interface layer and the upper perovskite-electron transport layer interface are discussed in focus, covering material selection, passivation mechanisms, process compatibility and stability enhancement. Finally, the future development and prospects of tandem cell technology are prospected, aiming to provide a reference for the advancement of silicon/perovskite tandem solar cells.

Keywords: Perovskite; Solar cell; Stacked battery; Interface engineering

0 引言

本文将从叠层电池的结构与制备工艺入手, 总结从互联层到下界面再到上界面的代表性方案, 并对晶硅/钙钛矿叠层电池界面工程的发展趋势进行展望。

1 两端晶硅/钙钛矿叠层电池的结构与制备工艺

两端晶硅/钙钛矿叠层电池的结构通常由晶硅底电池结合 p-i-n 钙钛矿顶电池组成, 自下而上为: 晶硅底电池/互联层或隧道复合结/钙钛矿顶电池(空穴传输层 HTL、钙钛矿吸收层、电子传输层 ETL)/透明导电层/金属电极栅线和减反层。图 1a 展示了目前主流采用的 HJT 异质结底电池+钙钛矿顶电池的器件结构, 为了保障叠层电池正常的运行, 钙钛矿电池的电极层以及载流子传输层均需

要保持一定的透明度, 使近红外光能更好的被晶硅底电池所利用^[1]。

为实现最佳光管理, 商业化晶硅底电池的前表面通常为随机金字塔纹理(尺寸 3-10 μm , 如图 1c 所示)。这种微米级三维粗糙表面对后续薄膜的均匀、保型覆盖构成了巨大障碍。旋涂等常规一步溶液法易在金字塔谷底或尖峰处形成覆盖不全或厚度不均的薄膜, 导致局部漏电、复合增加, 严重制约大面积器件性能与良率。为此, 部分晶硅底电池采用正面微制绒的工艺(表面纹理 500nm 左右, 如图 1b 所示)以适配溶液法的钙钛矿生长过程。另一方面则通过两步法生长钙钛矿实现不同绒面尺寸的均匀覆盖。

一步法通过优化溶液性质, 调控溶质配比和浓度, 配合特殊的结晶调控策略, 能够实现钙钛矿膜层在晶硅微绒

面上的全覆盖。相关研究指出，通过协同工程化钙钛矿组成与隧道结，可实现溶液处理共形钙钛矿沉积，并获得 33.38% 的高效率。然而，该工艺对前驱体配方和结晶动力学的控制要求极高，工艺窗口相对较窄。

两步法则结合了真空沉积与溶液处理的优势。首先，通过真空热蒸镀在纹理硅上保型沉积无机前驱体框架（如碘化铅（PbI₂）、溴化铯（CsBr）等），确保在复杂形貌上的均匀覆盖。然后再通过溶液法或气相辅助法的方式，使有机盐（如甲脒氢碘酸盐（FAI）等）与无机框架反应转化为钙钛矿。该方法成功解决了保形性难题，是适配于大绒面商用晶硅底电池的有效工艺，是当前实现高效率（>30%）叠层电池的关键工艺，被多项突破性工作所采用。然而由于第二步溶液法仍是自上而下进行反应生长钙钛矿，因此底部钙钛矿的结晶度和缺陷密度仍是限制其效率的关键因素。

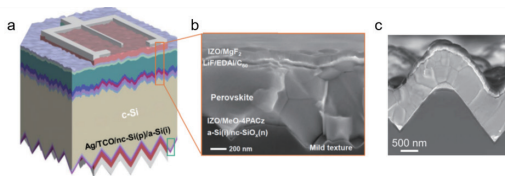


图1 (a) 两端晶硅/钙钛矿叠层电池结构；(b) 微绒面晶硅叠层电池截面图；(c) 大绒面晶硅叠层电池截面图

2 晶硅 / 钙钛矿叠层电池的界面工程

2.1 互联层 / 隧道复合结工程

互联层位于晶硅底电池的最上端和钙钛矿顶电池的最下端，其核心功能是促进来自钙钛矿和晶硅光生载流子的在此处高效、低损耗地复合，串联起晶硅和钙钛矿电池结构，一方面要求其具有良好的电学特性，另一方面需要具备高透光性保证底电池接受足够的入射光。

Wolf 等人采用超薄（5 纳米）非晶铟锌氧化物作为互联层透明导电氧化物，这种材料相较于常用的晶态透明导电氧化物无晶粒结构，表面电势均一性更高，且能提供更多的自组装单分子层锚定位点。结合超薄铟锌氧化物背电极带来的光学增强效应，以及经优化的正面接触叠层结构，制备的器件获得了 32.5% 的认证光电转换效率，同时这种超薄透明接触方案使铟的消耗量降低约 80%。

2.2 钙钛矿的下界面钝化工程

首先，下界面层的形貌、化学性质直接影响其上钙钛矿的成核与生长，尤其在晶硅倒金字塔绒面上，需要引导钙钛矿实现全覆盖、低缺陷的结晶，从而保证有效的电荷传输。其次，需要钝化硅或金属氧化物表面的悬挂键，并减少与钙钛矿间的界面态^[9]。

自组装单分子层（SAM）（如甲基 -4 膦酸吡啶等）因其超薄、能级可调、易于形成均匀覆盖，成为高效 p-i-n 结构钙钛矿电池的主流埋底界面材料。针对其在纹理硅上覆盖均一性和结合力的问题，He 等人提出提出了一种具有非对称结构的自组装分子（HTL201），作为宽带隙钙钛矿子电池的空穴选择层。非对称结构的引入显著增强了 SAM 的锚定能力，原位提升了 SAM 在硅绒面衬底的覆盖率及均匀性，优化了界面能级匹配。通过与双面纹理化的异质结晶硅结合，成功实现了开路电压接近 2.0V，且认证效率高达 34.6% 的两端晶硅 - 钙钛矿叠层太阳能电池（如图 2a、b、c 所示）。

为解决钙钛矿与硅之间热膨胀系数不匹配导致的残余应力问题，可以采用制备埋底埋底缓冲层和钝化层的方式。Yao 等人采用真空沉积技术，在埋底界面处构建了垂直方向的 3D 异质结构。使用晶格参数较小的 CsPbCl₃ 缓冲层来修饰埋底界面，可以缓解上层钙钛矿吸收层中的拉应力（如图 2d、e、f 所示）。将这种异质结构技术应用于钙钛矿 / 晶硅两端叠层太阳能电池中后，可以有效改善开路电压与填充因子等性能指标。实验室测试显示，该电池的转换效率超过了 32%；而经过认证的稳态效率为 31.5%（1.015 平方厘米）。

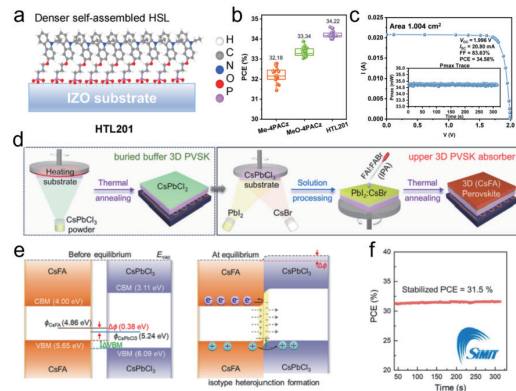


图2 晶硅/钙钛矿叠层电池埋底界面钝化工程策略

2.3 钙钛矿的上界面钝化工程

晶硅 / 钙钛矿叠层电池的顶电池通常采用宽带隙钙钛矿电池，相比于常规带隙钙钛矿电池，宽带隙电池中含溴和碘的混合卤化物体系容易发生卤化物相分离和界面缺陷富集，产生非辐射复合式开路电压出现下降。同时宽带隙钙钛矿电池的费米能级位置也有所不同，需要通过界面层钝化促进电子传输层中电荷的提取^[9]。

针对界面处多种类型的缺陷（如碘空位、甲脒空位、未配位 Pb²⁺ 等），采用两种或多种功能互补的分子进行协同钝化。例如，Xu 等人引入氟化锂（LiF）薄层与乙二

铵二碘 (EDAI) 分子构成双层交织钝化策略。其中, 纳米分散的 LiF 层首先改善电子提取, 随后沉积的 EDAI 分子进一步抑制非辐射复合。该策略使叠层电池获得了高达 33.89% 的认证效率和 83.0% 的填充因子。Wolff 等人两种具备互补钝化性能分子 (磷酸类分子与哌嗪鎓卤化物) 进行复合联用: 前者可钝化钙钛矿顶表面的缺陷, 后者则能优化能带排列、引入场效应、均化表面电势, 最终实现钙钛矿与电子传输层接触时的损耗降低。最终在 1cm² 叠层电池上实现了 31% 的转化效率, 并在 60cm² 的面积上实现了 28.9% 的效率。

Raji 等人采用一种兼容工业标准织构化硅基底的钙钛矿杂化两步沉积法, 并结合基于 1,3- 丙二胺二氢碘化物的钙钛矿表面处理工艺。该分子与钙钛矿表面的相互作用, 提升了电子选择接触处的多数载流子浓度, 从而降低了界面复合损耗; 同时, 这种场效应钝化作用提高了本征钙钛矿吸收层全域的电子浓度, 进而提升了材料电导率并减少了传输损耗。上述改性策略的协同作用, 制备出了高性能全织构化晶硅 / 钙钛矿叠层太阳能电池; 该器件在 1 个太阳标准光强 AM1.5G 条件下的光电转换效率达 33.1%, 开路电压为 2.01 V (如图 3c、d)。

(效率突破 34%), 但面向产业化的叠层电池片制备仍面临严峻挑战: 首先, 在全绒面、大面积的硅基底上, 实现所有界面层 (尤其是 SAM、超薄钝化层) 的均匀、保形、无损、可重复制备是量产的前提, 目前针对于商业级量产的大绒面硅片还没有完善的制备工艺。其次, 由于叠层电池功能层较多, 各功能层间的界面也同样随之增多, 其长期可靠性 (>25 年) 在真实户外复杂工况下尚未得到充分验证, 同时也面临着宽带隙钙钛矿带来的相分离等稳定性问题。最后, 成本控制是商业化无法回避的议题, 过多的高真空 (ALD、蒸发)、高耗材 (特殊有机分子) 或高精度工艺步骤会削弱叠层电池的成本竞争力。

展望未来, 如何实现高效均匀的界面传输, 以及通过界面改性实现钙钛矿层的均匀覆盖仍是晶硅 / 钙钛矿叠层电池需要解决的重点。首先, 需要对基础机理深入探索, 利用原位表征和理论计算, 厘清界面处的载流子动力学、离子迁移、应力演化与降解通路。其次, 开发兼具高效、稳定、可扩展且低成本的界面材料与工艺, 重点解决在大面积商业级绒面晶硅电池表面的钙钛矿成膜工艺。第三, 推动标准化测试与户外实证, 建立针对叠层电池界面可靠性的加速老化测试协议, 并在不同气候区进行长期户外示范, 为技术迭代和产业投资提供坚实数据支撑。

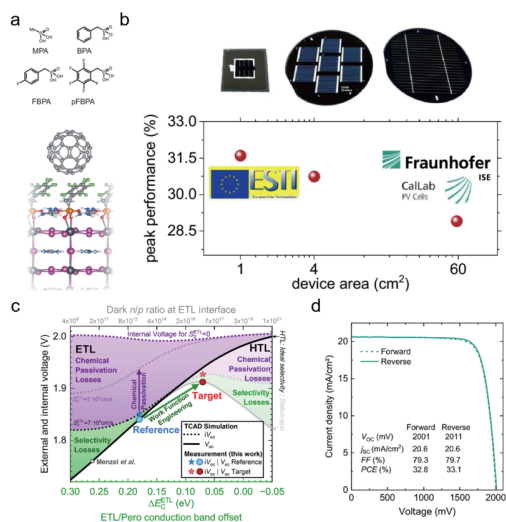


图3 晶硅/钙钛矿叠层电池的表面钝化工程

3 总结与展望

尽管晶硅 / 钙钛矿叠层电池已取得了举世瞩目的进展

参考文献:

[1] JIA L, XIA S, LI J, et al. Efficient perovskite/silicon tandem with asymmetric self-assembly molecule[J/OL]. Nature, 2025, 644(8078): 912-919.

[2] CHEN Y, YANG N, ZHENG G, et al. Nuclei engineering for even halide distribution in stable perovskite/silicon tandem solar cells[J/OL]. Science, 2024, 385(6708): 554-560.

[3] ER-RAJI O, MESSMER C, PRADHAN R R, et al. Electron accumulation across the perovskite layer enhances tandem solar cells with textured silicon[J/OL]. Science, 2025, 390(6772): eadx1745.

作者简介: 杨铁斌 (1997.02-), 男, 汉族, 黑龙江宁安人, 博士研究生, 研究方向: 从事钙钛矿太阳能电池研究。