

综述

影响钙钛矿/异质结叠层太阳能电池效率及稳定性的关键问题与解决方法

姚美灵¹⁾ 廖纪星¹⁾ 逯好峰^{1)†} 黄强¹⁾ 崔艳峰¹⁾
李翔¹⁾ 杨雪莹²⁾ 白杨^{2)‡}

1) (中能创低碳新能源科技(常州)有限责任公司, 常州 213000)

2) (中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518000)

(2023年12月18日收到; 2024年1月29日收到修改稿)

高效且稳定的钙钛矿/异质结叠层太阳能电池是学术界与工业界共同探索的方向, 目前小面积叠层太阳能电池效率优势已然非常明显, 但在商业化推进过程中, 叠层路线在电池结构与界面调控、钙钛矿材料选型与优化、器件尺寸放大以及稳定性等方面仍存在许多挑战. 本文通过收集相关文献资料, 包括实验数据和理论模拟结果, 对钙钛矿/异质结叠层太阳能电池的研究现状进行分析, 认为未来的研究方向可能涉及叠层顶电池的界面调控及组件互联结构设计等关键问题. 因此, 文章重点阐述钙钛矿/异质结叠层太阳能电池各关键材料层的优化选型、钙钛矿带隙优化与离子迁移抑制、层间界面传输调控、底电池连接层优化及组件互联与封装方式优化. 基于现有研究成果对叠层太阳能电池技术进行了总结和探索展望, 旨在为后续叠层太阳能电池结构设计的各关键问题提供方向性解决建议.

关键词: 钙钛矿材料, 异质结太阳能电池, 两端子与四端子叠层结构, 商业化进程

PACS: 88.40.hj, 88.40.jp, 73.40.Lq, 84.60.Jt

DOI: 10.7498/aps.73.20231977

1 引言

在全球碳中和的背景下, 尽快扩大清洁能源的使用占比是全社会共同努力的方向. 太阳能是最有潜力承担能源转型重任的可再生能源, 国家能源局数据显示, 截至2023年10月中国累计光伏装机约5.4亿千瓦. 晶硅太阳能电池技术作为光伏领域主力军已实现大规模商业化, 其光电转换效率也从14%发展到26.81%^[1]. 近二十年来行业重心一直围绕度电成本展开^[2], 发电侧电池效率每提升1%, 下游电站度电成本降低5%以上. 因此, 提升电池效率是降低成本的决定性因素, 也是光伏路线的永恒主题.

单晶硅太阳能电池效率已逐渐接近29.4%^[3]的理论极限, 限制了度电成本进一步降低的潜力. 结合不同带隙半导体材料的化学、物理和机械性质, 可以突破单一组分性质及效率限制^[4], 因此, 叠层电池作为一种全新的技术路线得到了快速发展^[5]. 钙钛矿/晶硅叠层是目前光伏太阳能电池领域一个非常重要的产业化方向, 也是现阶段晶硅太阳能电池实现结构突破性升级的首选方案. 其中钙钛矿活性材料可通过改变组分类型与配比实现带隙的自由调控, 光吸收系数高、缺陷容忍度高、成本低、带隙可调、工艺简单及弱光性能好等优点也使这种新型的光电材料拥有极大的发展潜力.

设法获取更加匹配的电池结构是保证叠层太阳能电池具有良好性能的关键. 异质结太阳能电

† 通信作者. E-mail: luhf@cando-solar.com

‡ 通信作者. E-mail: y.bai@siat.ac.cn

池 (HJT) 因其较高的转换效率和双面发电能力^[6], 及低于常规晶硅电池的温度系数 (约 $-0.25\%/^{\circ}\text{C}$)^[7,8] 等优势, 在众多光伏技术路线中脱颖而出. HJT 表面的透明导电氧化物 (TCO) 薄膜作为天然的中间隧穿层, 有效实现了电池片的上下串联, 此独特优势使 HJT 成为钙钛矿/晶硅叠层路线中的最优底电池选择.

目前国内外已有多家企业如 Oxford PV、协鑫、仁烁、纤纳、极电、隆基、曜能、华晟、宝馨等正在积极布局钙钛矿及叠层太阳能电池研发路线. 其中 Oxford PV 的异质结+钙钛矿叠层太阳能电池项目已进入实质性量产阶段, 规划产能 100 MW. 遍布全球的各大科研院所与企业均在钙钛矿/异质结叠层太阳能电池领域投入颇多, 不断拓宽叠层电池的效率边际^[9]. 隆基绿能报道的 33.9% 是目前小面积钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池的最高效率纪录. 曜能科技在商业级 M6 规格硅片上制备的叠层太阳能电池组件, 光电转换效率 (PCE) 达 25.45%, 超越晶硅冠军组件效率约 0.7%.

叠加钙钛矿材料以提高太阳能电池对紫外波段的光能利用率是钙钛矿/异质结叠层太阳能电池的设计初衷, 通过各层结构吸收光谱的合理分配, 理论上可以将太阳能电池的 PCE 提升到 40% 以

上, 有望实现光伏度电成本在更长周期范围内的进一步降低. 然而, 叠层路线在电池结构设计及界面调控、钙钛矿材料选型与优化、器件尺寸放大以及稳定性等方面仍存在许多挑战. 因此, 本文主要围绕钙钛矿/异质结叠层太阳能电池 (PTSC) 的结构设计及其实现商业化过程中影响效率与稳定性的关键问题展开, 包括叠层太阳能电池的带隙调节、添加剂工程、层间界面接触与钝化、异质结底电池界面设计以及组件封装适应性等, 对叠层太阳能电池技术的发展进行探索展望, 旨在为后续叠层电池结构设计的各关键问题提供方向性解决建议.

2 PTSC 与带隙调节

2.1 PTSC 工作原理与结构

PTSC 通常由两个主要部分组成: 顶部的钙钛矿电池和底部的晶硅电池. 较宽带隙的吸光层位于电池顶部, 收集大部分高能光子, 而底部较窄带隙的材料可以吸收剩余的 low 能光子. 叠层电池的基本工作原理是通过在光学序列中堆叠具有不同带隙 (E_g) 的结构层, 以实现太阳光谱的高效利用 (图 1)^[10], 当光子被吸收后激发出的电子和空穴在内建电场的帮助下分别向两个电极传输, 最终在电

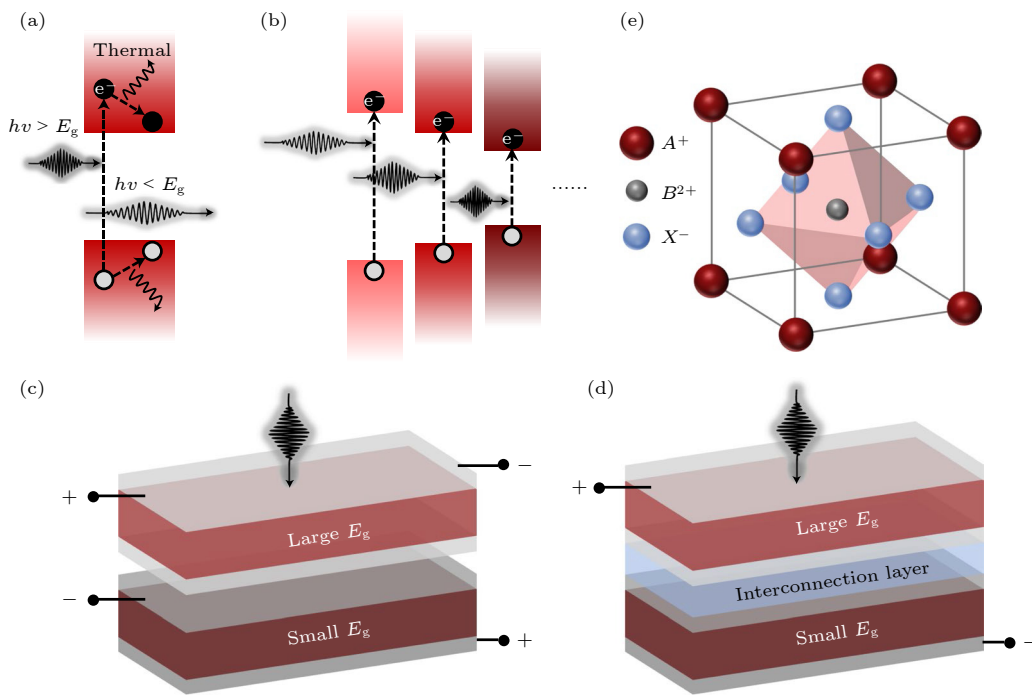


图 1 叠层电池工作原理, 单结 (a) 和多结 (b) 光伏电池中的光吸收示意图; 叠层太阳能电池中四端子 (c) 和两端子 (d) 叠层电池; (e) 金属卤化物钙钛矿的晶体结构^[10]

Fig. 1. Introduction of tandem PVs: Schematic illustration showing light absorption in single (a) and multijunction (b) PVs; four-terminal (c) and two-terminal (d) tandem PVs; (e) crystal structure of metal halide perovskites^[10].

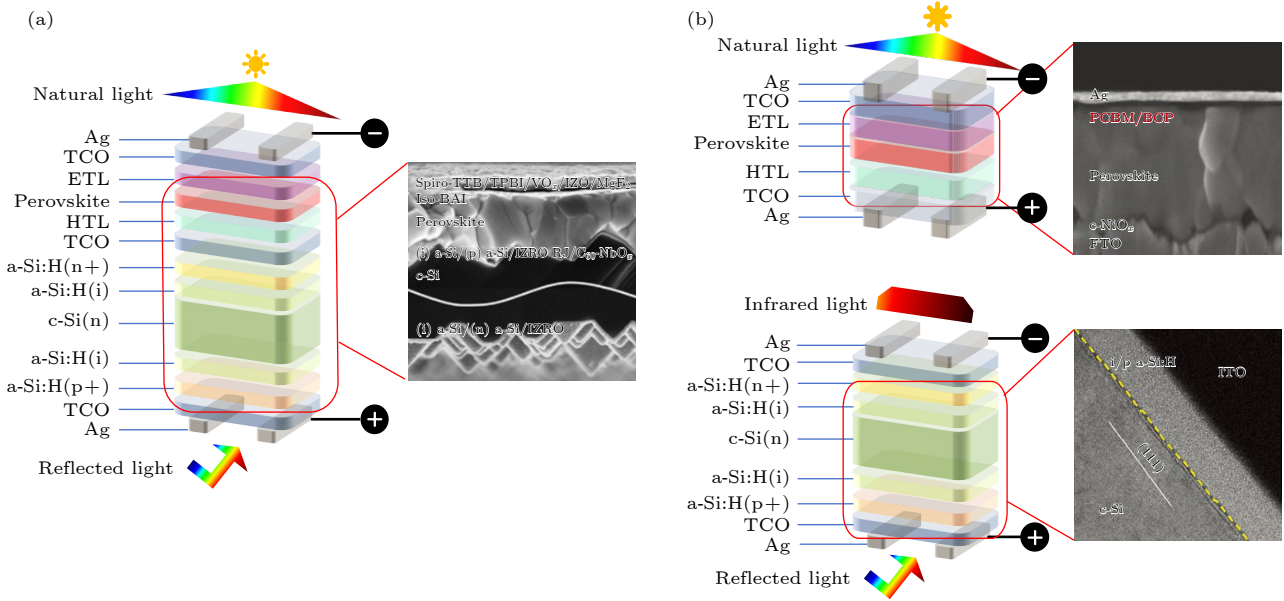


图 2 (a) 两端子 (2T) 钙钛矿/异质结叠层太阳能电池结构设计及其典型扫描电镜 (SEM) 图示^[14]; (b) 四端子 (4T) 钙钛矿/异质结叠层电池结构设计及各单结电池对应典型 SEM 图示^[15,16]

Fig. 2. (a) Structure of two-terminal (2T) perovskite/heterojunction tandem solar cells (PTSC), and scanning electron microscopy (SEM) of 2T PTSC^[14]; (b) four-terminal (4T) PTSC structure, and SEM of each single-junction solar cell^[15,16].

池的两端产生电压。钙钛矿顶电池按照沉积顺序可分为 n-i-p 正式与 p-i-n 反式结构^[11]。反式结构由于较为优异的稳定性和成为叠层钙钛矿顶电池的常用结构^[12]，光电转换效率基本与正式持平^[13]。

按照电流汇集方式可以将叠层电池结构分为两端子 (2T) 和四端子 (4T) 两类^[17]，如图 2 所示。2T PTSC 以异质结电池前表面 TCO 层作为隧穿层直接实现晶硅与钙钛矿电池的有效串联。Chin 等^[18]通过这种方式获得的 2T 叠层太阳能电池 V_{OC} 达到 1.91 V, J_{SC} 为 20.47 mA/cm²，经认证的 PCE 达到 31.25% (孔径面积约为 1.17 cm²)。但为了形成更均匀的钙钛矿晶体，异质结底电池的前表面绒面一般要进行抛光或微绒面处理，这将对底电池的光捕获造成部分影响。此外，由于集成配置中顶电池和底电池串联电耦合导致串联器件的短路电流密度 (J_{SC}) 受到最低子电池 J_{SC} 的限制，两侧电池的电流密度差距较大时会出现较大的电流损失与电池组件发热问题。因此严格满足子电池之间的电流匹配是制造 2T 叠层太阳能电池的首要挑战^[19]。

4T PTSC 由电路结构中完全独立的两个子电池构成，无需考虑电流匹配及晶硅绒面高度对钙钛矿晶体形成的影响，且两侧子电池之间只存在光学耦合，工艺简单。Jaysankar 等^[20]以这种方式实现了面积为 0.13 cm²，PCE 为 27.1% 的钙钛矿太阳

能电池，并将 7 个串联的钙钛矿微型组件堆叠在晶硅电池组件上，整体 4T 叠层电池面积达到 4 cm²，PCE 为 25.3%。然而，4T 叠层结构需要额外的透明电极及玻璃层，在封装和制造成本方面消耗更多，且存在电压匹配问题亟待解决。

两种结构路线各有优劣，2T 叠层优化路线在长期发展中更符合低成本高效能的理论优势，且具有更小的寄生吸收和更广阔的商业应用前景。但目前大面积 2T 叠层太阳能电池由于电学耦合及异质界面带来的传输与损耗等问题造成其制备难度及工艺控制要求更高。而 4T 叠层电池仅以机械方式堆叠，两个子电池在结构上相对独立，单晶硅及单结钙钛矿顶电池的制备工艺均相对成熟，每个子电池都可以达到最佳性能，以获得更高性能的 4T 叠层电池。此外，通过可拆卸的四端子连接方案更方便于技术迭代，从而保留使用寿命更长的晶硅电池，适用于现有晶硅组件端效率提升与改造。

2.2 钙钛矿顶电池关键问题

2.2.1 钙钛矿材料制备与工艺放大问题

钙钛矿吸收层是叠层顶电池结构中的关键材料，目前大部分高性能钙钛矿吸收层主要通过旋涂方式获得，有效面积较小。通常将卤化铅 (PbX, X: I 或 Br)、甲脒类盐 (FAX, X: I 或 Br)、甲铵类盐

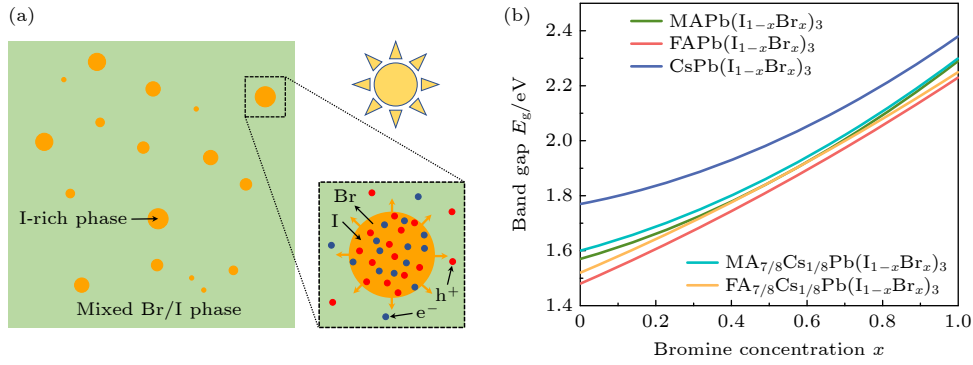


图 3 光诱导卤化物偏析机制 (a) 在光照下从 I/Br 混合相中形成富碘相的成核^[32]; (b) 不同化合物的带隙与相对溴浓度 (x) 的函数关系^[32]

Fig. 3. Mechanism of photo-induced halide polarization: (a) Nucleation of an I-rich phase from an I/Br mixed phase under light irradiation^[32]; (b) band gap of different compounds as a function of relative bromine concentration, x ^[32].

(MAX, X: I 或 Br)、卤化铯 (CsX, X: I 或 Br) 等溶于二甲基甲酰胺 (DMF)、二甲基亚砜 (DMSO) 或 N-甲基-2-吡咯烷酮 (NMP) 的混合溶剂中制得前驱体溶液, 并在其旋涂过程中滴加氯苯、甲苯或苯甲醚等反溶剂以调节结晶速度与质量, 获得结晶度较高的钙钛矿晶体^[21,22].

材料更低成本的实现取决于薄膜沉积技术的放大能力, 旋涂法在大面积薄膜电池制备中涂敷及结晶表现较差, 因此探索其他可放大的工艺方式来获取高质量的钙钛矿晶体对于实现钙钛矿叠层太阳能电池的商业化至关重要. 目前有望实现大规模制备的方式主要有狭缝涂布^[23]、刮刀涂布^[24-26]、蒸镀法^[27-29]等, 以干法 (蒸镀) 结合湿法 (狭缝) 的制备方式也是有望实现更高膜层质量的一种新方式. PTSC 的制备目前正在进入放大尺寸提升效率的关键时期, 随着仪器控制精度的提升, 高结晶质量钙钛矿薄膜有望从 0.1 cm^2 的实验室尺寸放大到 m^2 级大尺寸.

2.2.2 钙钛矿材料的带隙调节与稳定性问题

钙钛矿单结太阳能电池的理想带隙为 $1.4-1.5 \text{ eV}$, 当钙钛矿层作为叠层顶电池时, 理想带隙拓宽到 1.6 eV 以上. 通过改变钙钛矿组分与配比可以实现带隙调谐^[30], 如提高溴碘比可以使带隙增加^[31,32], 如图 3(b), 但溴的引入会使钙钛矿材料中碘及溴化物出现富集域, 从而导致相偏析与分离现象. Draguta 等^[33] 结合光谱测量和理论建模分析相分离过程中发生的所有微观过程, 发现富碘相的带隙减小是诱导碘化物和溴化物分离的驱动力, 设计减少注入载流子密度或载流子扩散长度可以控

制混合卤化物钙钛矿中的相分离.

光致卤素偏析现象的现有理论仍无法解释卤素偏析的光照强度阈值及 Cs 在抑制钙钛矿卤素相分离机制等问题. 因此, Chen 等^[32] 针对钙钛矿中卤素偏析现象提出了统一的热力学理论, 并对富碘相形成的微观机理做出解释, 如图 3(a), 光照下电子和空穴进入低能隙富碘核, 导致分离自由能降低, 同时富碘核通过碘的内向扩散和溴的外向扩散得以增长, 最终导致相分离.

调控钙钛矿的溴碘比或添加额外表面活性剂是缓解相偏析问题的常用手段. 前者涉及带隙调节与富集域问题的权衡, 后者则涉及添加其他物质以促进钙钛矿晶体形成或抑制离子迁移等, 相关研究将在第 3 节加以阐述.

3 钙钛矿材料添加剂工程

钙钛矿吸收剂在商业上的成功依赖于最高工业稳定标准的达成. 然而目前钙钛矿单结太阳能电池的稳定时间仍比国际电工委员会 61215:2016 规定的 25 年寿命低 1 个数量级^[34]. 钙钛矿材料的本征不稳定性, 以及由于外界的水、氧、光、热等工作条件下造成的材料稳定性问题, 都会导致钙钛矿太阳能电池性能衰减. 前沿研究大多采用添加剂工程以提高钙钛矿结晶质量及晶体稳定性, 添加剂的加入通过增强前驱体溶液-衬底动力学、抑制离子迁移、增强界面间载流子传输能力以及提高钝化水平等关键作用, 助力钙钛矿叠层实现器件效率与稳定性的协同增强.

3.1 流体动力学增强

复杂的流体动力学限制了大面积均匀钙钛矿晶体薄膜的前驱体溶液沉积, 其中包括前驱体与衬底动力学及结晶动力学. 前者的提高主要取决于钙钛矿前驱体与衬底之间的浸润性差异, 例如在疏水性聚三烯胺 (PTAA) 表面上沉积亲水性的钙钛矿前驱体溶液, 会出现前驱体溶液无法全面覆盖衬底并造成后续结晶不均匀的现象. Subbiah 等^[35]通过加入表面活性剂 LP(L- α -磷脂酰胆碱) 对钙钛矿溶液的浸润性进行调整, 制备出用于纹理基底上的 1.68 eV 宽带隙 MAPb(I_{0.75}Br_{0.25})₃ 前驱体溶液. 其中表面活性剂 LP 的加入使前驱体溶液与衬底动力学得以改善, 所得钙钛矿前驱体溶液均匀覆盖衬底表面, 并达到 21.8% 的 PCE.

在结晶动力学方面, Chin 等^[18]以 2, 3, 4, 5, 6-五氟苄基膦酸 (FBPAC) 为添加剂探究钙钛矿结晶过程, 发现 FBPAC 的加入可以抑制新的钙钛矿晶粒或域的出现, 并使材料保持较慢的结晶速率, 这可能源于 FBPAC 与其他钙钛矿前驱体 (即 FAI 和 FABr) 之间及 Pb²⁺ 的配位竞争. 亦有研究对钙钛矿结晶形成过程中的微观变化与影响进行探索, Deng 等^[26]以微观结晶状态为依据对比四种表面活性剂对结晶过程的影响, 发现极少量 (百万分之几十) 表面活性剂可以显著改变流体干燥动力学. 利用亲水性和疏水性官能团在溶液表面自组装降低溶液的表面张力, 抵消晶体形成过程的原始流体流动, 使结晶表面更均匀致密, 并实现超过 20% 小面积太阳能电池效率.

3.2 离子迁移抑制

钙钛矿层离子迁移问题是影响器件稳定性的一个重要因素. 本质上, 金属卤化物钙钛矿的软晶格和较弱化学键通常会导致大量的缺陷, 如间隙、空位和杂质缺陷, 这些缺陷在钙钛矿中作为复合中心存在, 造成非辐射电荷复合^[36]. 同时, 空位缺陷、晶界等是离子迁移的通道, 由复合中心俘获载流子形成的正电或负电中心会导致局域电场的产生^[37], 驱使离子沿着离子迁移通道发生移动, 加速器件衰减.

添加剂配置可以减少由缺陷带来的离子迁移问题, Yang 等^[38]采用三溴离子缺陷抑制剂以减少深能级缺陷与非辐射电荷复合, 将钙钛矿/晶硅叠

层太阳能电池的效率提高到 28.6%, 且封装后器件稳定运行时间超过 550 h. 离子迁移过程中存在离子间的相互促进, 例如碘化物空位容易诱发不饱和和 Pb, 这是导致金属铅生成的主要因素^[39], 有机阳离子迁移也会促进碘离子迁移. 2 维/3 维 (2D/3D) 钙钛矿异质结被广泛用于钝化缺陷并抑制钙钛矿薄膜表面的离子迁移. Zhang 等^[40]制备出在 3D 钙钛矿下方带有可交联配体的 2D 钙钛矿, 通过底部接触异质的界面工程抑制复合问题, 促进载流子提取并形成理想的能级排列. 该策略所得钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池 PCE 达到 28.4% (1.0 cm²), 且在运行超过 1000 h 后仍能保留 89% 的初始效率. 抑制离子迁移的研究已有许多成果^[41-43], 但多数只涉及防止离子迁移的部分, 而没有讨论钙钛矿晶格修复^[44-46]. Zhang 等^[47]使用超分子——淀粉碘作为缓冲层, 既可以防止碘离子的迁移, 还可以反补碘离子起到修复钙钛矿晶格的作用 (图 4). 光照下相分离是器件性能衰退的主要原因之一, 而淀粉碘可以防止相的分离和转变.

3.3 层间界面接触与钝化

钙钛矿材料由于其空穴和电子的有效质量相近, 表现出同时传输电子和空穴的双极性导电性能, 所以一定意义上钙钛矿太阳能电池可以不设置载流子传输层. 但钙钛矿作为一种直接带隙半导体材料, 其价带电子可以垂直跃迁到导带, 跃迁过程中动量守恒, 同样导带电子下落到价带时动量也保持不变, 即电子与空穴只要相遇就会直接复合, 无需声子来提供或接受动量, 这种特性导致钙钛矿太阳能电池具有较短的载流子寿命. 因此, 设计传输层将光生载流子尽快分离并以损失最小的方式传输出去, 对于提高器件性能至关重要.

常见的载流子传输层包括电子传输层和空穴传输层, 它们与钙钛矿之间接触窗口层质量、层间厚度与能级匹配决定了整个器件的光电转换效率^[48]. 大部分研究聚焦于在钙钛矿吸收层与电极间引入传输层以平衡载流子在层间的传输, 引入钝化阻挡层防止激子在电极界面复合. 下面分别介绍以上提及的几种辅助层及其层间优化方案.

3.3.1 电子传输层及其界面接触优化

钙钛矿薄膜中载流子的输运特性, 为在器件结构中实现异质界面间的有效提取提供了保障. 电

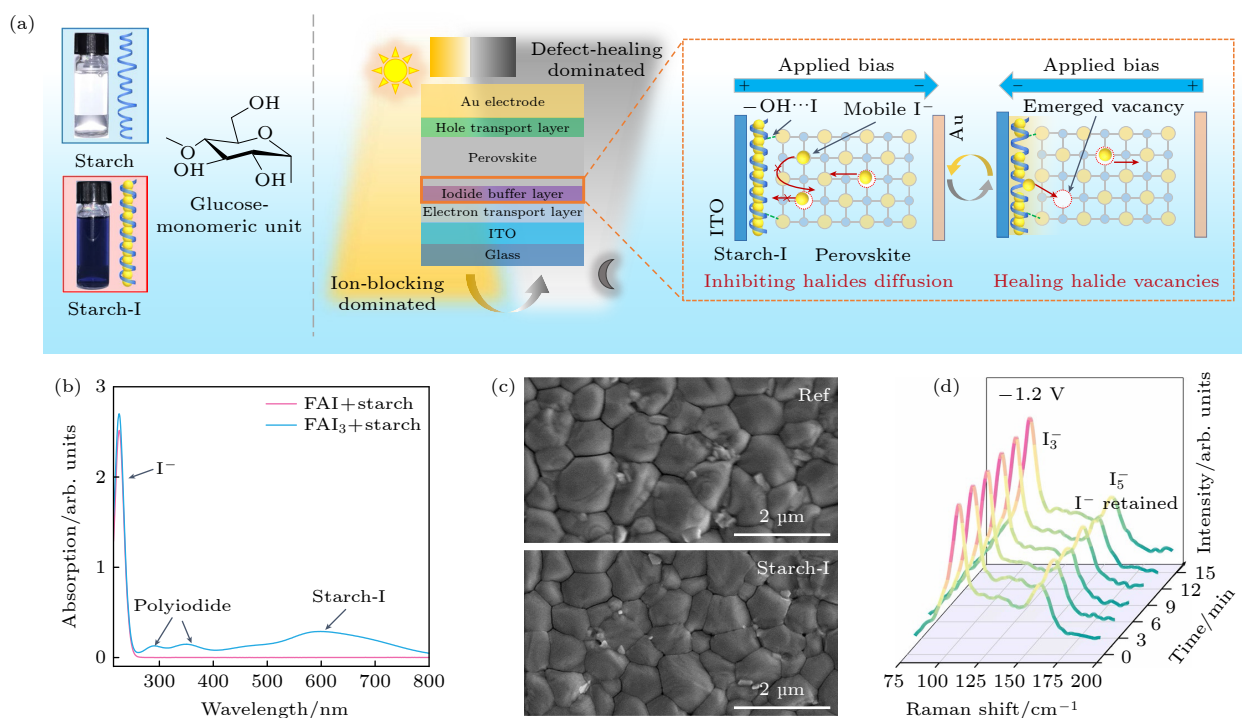

 图 4 超分子淀粉碘的结构性质及其与钙钛矿的相互作用机制^[47]

 Fig. 4. Structure of supramolecular amyloid iodine and its mechanism of interaction with perovskite^[47].

子传输层 (ETL) 通过与钙钛矿吸收层形成选择性接触提高光生电子抽取效率, 并有效地阻挡空穴向阴极方向迁移. 钙钛矿与 ETL 界面间的缺陷、悬空键都有可能引起光生载流子的非辐射复合, 降低器件 V_{OC} 并对填充因子产生不利影响^[49]. 顺序界面工程、缓冲层钝化等是减少或修复缺陷并优化界面传输的成功方法^[50]. Liu 等^[51]提出的顺序界面工程 (SIE) 策略, 通过协同缩小导带偏移并降低钙钛矿/富勒烯 (C_{60}) 界面处的损耗与复合速度, 在 1 cm^2 单片 PTSC 中获得了 29.6% 的稳态效率 (经认证效率为 29.0%). Mariotti 等^[52]通过将三卤化物钙钛矿与碘化吡啶 (PI) 界面改性相结合 (图 5), 使能带排列得到改善, 所得 PTSC 开路电压高达 2.0 V, 经认证的 PCE 高达 32.5%.

在 ETL 与钙钛矿界面间添加缓冲层也是优化界面接触的一种方式, Liu 等^[53]以金属氟化物 (例如 NaF , CaF_x 和 MgF_x) 作为钙钛矿/ C_{60} 界面的中间层, 通过调整电荷传输实现稳定 PCE 达到 29.3%. 以 MgF_x 为优选的缓冲层有利地调节了钙钛矿层的表面能并促进电子的有效提取. 氟化锂 (LiF) 等锂盐作为界面间缓冲层也常有报道^[54]. Dagar 等^[55]通过在 C_{60} 和钙钛矿之间沉积 LiF 界面缓冲层, 有效地提高了电池的开路电压, 获得 PCE 为 22.3%

的 p-i-n 型钙钛矿太阳能电池, 并通过在钙钛矿薄膜中使用氯甲胺 (FACI) 添加剂以弥补由于引入锂盐而降低的器件长期稳定性.

3.3.2 空穴传输层及其界面接触优化

PTSC 常用的反式钙钛矿器件中, 空穴传输层 (HTL) 作为最先制备的功能层, 其作用主要体现在阻挡电子并防止钙钛矿活性层与电极直接接触而引起的复合, 从而实现载流子更好的分离. 通过合理的分子结构设计和优化, 开发低成本、高性能的空穴传输材料是目前的研究重点. Al-Ashouri 等^[56]以自组装的甲基取代咪唑单层 (SAM) 为钙钛矿太阳能电池 HTL, 通过快速空穴提取和最小化空穴选择界面的非辐射复合, 得到在光照下 PCE 达到 29.15% 的叠层太阳能电池. Zhao 等^[57]也报道了一种由酸掺杂聚合物堆叠在无掺杂聚合物上的双层 HTL 结构, 其中无掺杂聚合物与钙钛矿和酸掺杂聚合物之间提供酸屏障, 器件在高温下表现出稳定的欧姆接触, 且未封装器件在金属卤化物灯下连续工作 1450 h 后, 其峰值效率保持在 99%.

钙钛矿/HTL 界面处更快的载流子提取及其电荷转移性质是高效钙钛矿叠层太阳能电池器件效率及稳定性的主要限制因素. Sarritzu 等^[58]采

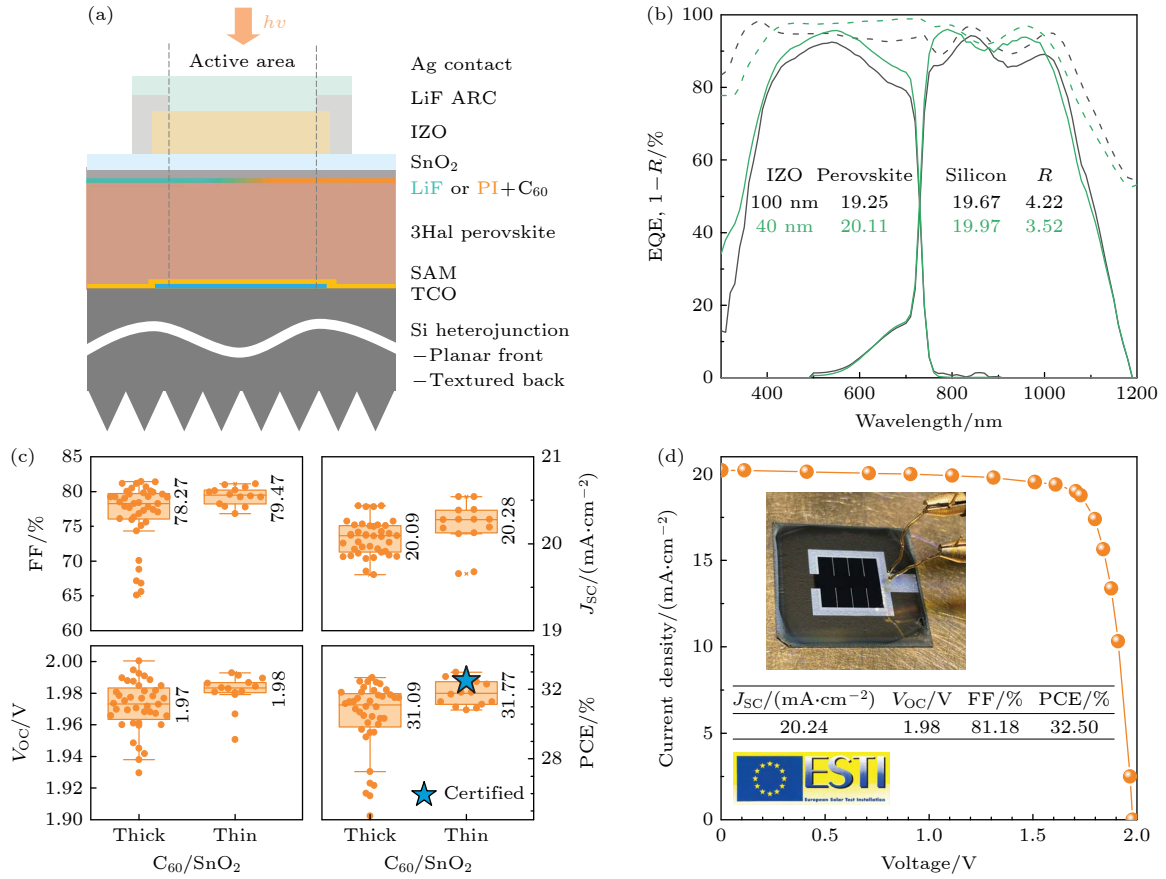


图 5 PI 优化的钙钛矿/异质结叠层太阳能电池结构与性能^[52]

Fig. 5. Piperazine iodide-optimised structure and performance of perovskite heterojunction tandem solar cells^[52].

用全光学技术研究了导致光转换损耗的微观起源, 评估器件中的每个接口层的引入导致的额外复合电流. 提出通过对 HTL 进行表面处理以抑制这些缺陷并提高界面传输效率, Li 等^[59]报道了一种由氧化镍 (NiO_x) 组成的耐热 HTL 材料, 其具有表面锚定膦酸 (MeO-4PADBC)SAM 的纳米颗粒薄膜 (图 6), 通过将 SAM 分子固定在 NiO_x /钙钛矿界面, 为热稳定的钙钛矿太阳能电池提供理想的能量排列、快速的空穴提取和低缺陷密度的 HTL. 这种界面配置获得器件 V_{oc} 为 1.19 V, 经验证的 PCE 达到 25.6%.

3.3.3 层间界面钝化

除了层间载流子传输的优化, 在钙钛矿吸收层内部或与层间界面间进行钝化^[60], 以防止激子在电极界面复合是实现高效叠层器件的重要方式^[61]. 钝化按照原理主要分为通过调节界面载流子行为的场效应钝化以及通过化学键形成来消除或修复缺陷的化学钝化.

场效应钝化主要利用氧化铝等材料在器件表

面形成一层物理钝化保护层, 厚度为 3—5 nm. 涂布法可以实现精度极限约为 10 nm 的钝化层薄膜制备, 但均匀性与质量较难控制. 磁控溅射法 (PVD) 与反应等离子体沉积法 (RPD) 可以实现更为精准的厚度控制, 但可能会对钙钛矿层造成损伤, 且设备价格昂贵. 钝化材料的厚度控制涉及“钝化-传输”矛盾问题的权衡, 对填充因子与电流密度等器件性能影响较大. 为了减少钝化厚度的敏感性, Peng 等^[62]提出一种多孔绝缘接触 (PIC) 的新型结构和突破方案, 用具有随机纳米级开口的厚 (约 100 nm) 介电掩模替代传统的超薄 (约 1 nm) 钝化层, 迫使载流子通过局部开口区域进行传输, 实现 p-i-n 结构 25.5% 的最高单结效率 (稳态认证效率纪录 24.7%).

化学钝化主要利用化学键在钙钛矿晶体表面生成一层化学物质来保护钙钛矿晶体吸收层. 例如在钙钛矿前驱体溶液中添加少量双边烷基胺 (BAA)^[63]可以抑制铅离子的逃逸, 主要钝化机制为通过配位键连接缺陷 Pb^{2+} 离子和 $-\text{NH}_2$ 尾部以实现钙钛矿晶粒的表面钝化. 在钙钛矿表面锚定

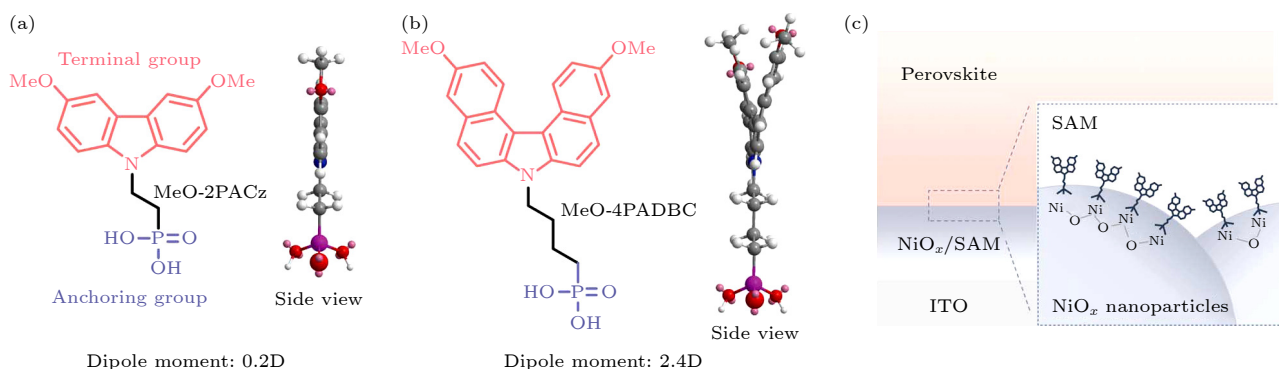


图6 表面存在SAM锚定的NiO_x分子结构,分子结构和侧视图 (a) MeO-2PACz^[59]; (b) MeO-4PADBC^[59]; (c) MeO-4PADBC锚定在NiO_x纳米颗粒上^[59]

Fig. 6. Molecular structure of HTL. Molecular structure and side view of (a) MeO-2PACz, (b) MeO-4PADBC, and (c) MeO-4PADBC anchoring on NiO_x nanoparticles as HTL in PSC^[59].

自限钝化剂(1-丁硫醇)^[64]也可以实现化学钝化,得到钙钛矿/硅叠层太阳能电池25.7%的独立认证PCE.

探索可以集成到器件接触堆叠中而不危及载流子提取的表面钝化材料,并深入讨论其潜在的钝化机制引发了研究者的关注,Su等^[65]提出一种将空穴传输层的氧化与钝化相结合的一体化策略,利用EIm+咪唑基团极强的吸电子能力,在晶体形成过程中EIm分子被均匀分散在钙钛矿的前界面、晶界及后界面,实现对钙钛矿整体的均匀钝化,所得器件在1.04 cm²面积下PCE达到23.41%.钝化钙钛矿中的埋底缺陷也是实现载流子动力学调控的另一种手段.通过在SnO₂纳米粒子中掺入甲脒草酸盐(FOA)(图7),确保缺陷最小化的同时实现优异的界面接触^[66],甲脒离子和草酸根离子积聚在SnO₂与钙钛矿埋底界面处以实现钝化作用.

关于叠层电池添加剂工程的研究报道远不止这些,盐酸苯乙双胍^[67]、酒石酸钾^[68]、正丁基溴化铵^[69]以及路易斯酸/碱^[70]等均可用于钝化器件中存在的缺陷,添加剂调控已成为普遍应用以提高PTSC性能的关键方法之一.

4 异质结底电池及界面设计

PTSC底电池的界面设计对实现高效匹配的叠层电池非常重要.前沿研究为实现高质量钙钛矿吸收层的沉积,对晶硅侧表面结构进行特殊设计与调整,尤其在两端子PTSC路线中对制绒工艺进行调整.此外,连接钙钛矿顶电池与异质结底电池的中间TCO界面也是PTSC界面设计中非常关

键的环节,其膜层厚度、沉积方式以及表面润湿性对叠层电池性能都有较大的影响.

4.1 微绒面设计与工艺优化

单晶硅片表面金字塔绒面平均大小在1.5 μm以上,平均高度在1.4 μm以上,较高的绒面结构虽然能使入射光在太阳电池内部进行多次反射,提高吸收光从而减少反射损失^[71],但会影响后续钙钛矿膜沉积与结晶均匀性.一般可以通过调整制绒剂中表面活性剂的成分,抑制[111]晶向面反应,促进[100]晶向面反应,使金字塔尖端轻微腐蚀,塔尖变圆润.De Bastiani等^[72]针对硅表面绒面如何影响钙钛矿薄膜性能展开研究,发现晶硅绒面对钙钛矿吸收层的主要影响来源于不同衬底上形成的钙钛矿晶体光致发光光谱响应(PL)的改变,这与钙钛矿的厚度变化有关.由于绒面上形成的钙钛矿薄膜更厚,发射的光子具有较高的重吸收概率.金字塔表面诱导的光捕获有效地增加了钙钛矿薄膜中声子路径的长度,从而产生类似的再吸收效应.这些因素最终导致PL光谱向较低光子能量偏移,从而实现绒面衬底上PCE高达28.1%的高效钙钛矿/硅叠层太阳能电池.

此外,绒面尺寸与制绒工艺密切相关,例如制绒温度从65 °C提高到90 °C,绒面尺寸从平均0.4 μm增加1.2 μm;制绒时间从5 min延长到20 min,绒面尺寸从0.2 μm增加到1.0 μm;制绒主剂KOH浓度从0.75%增加到2.89%,绒面尺寸从0.6 μm增加到2 μm.因此可以通过改变制绒工艺调整晶硅表面绒面高度,实现钙钛矿顶电池与晶硅底电池的良好匹配.

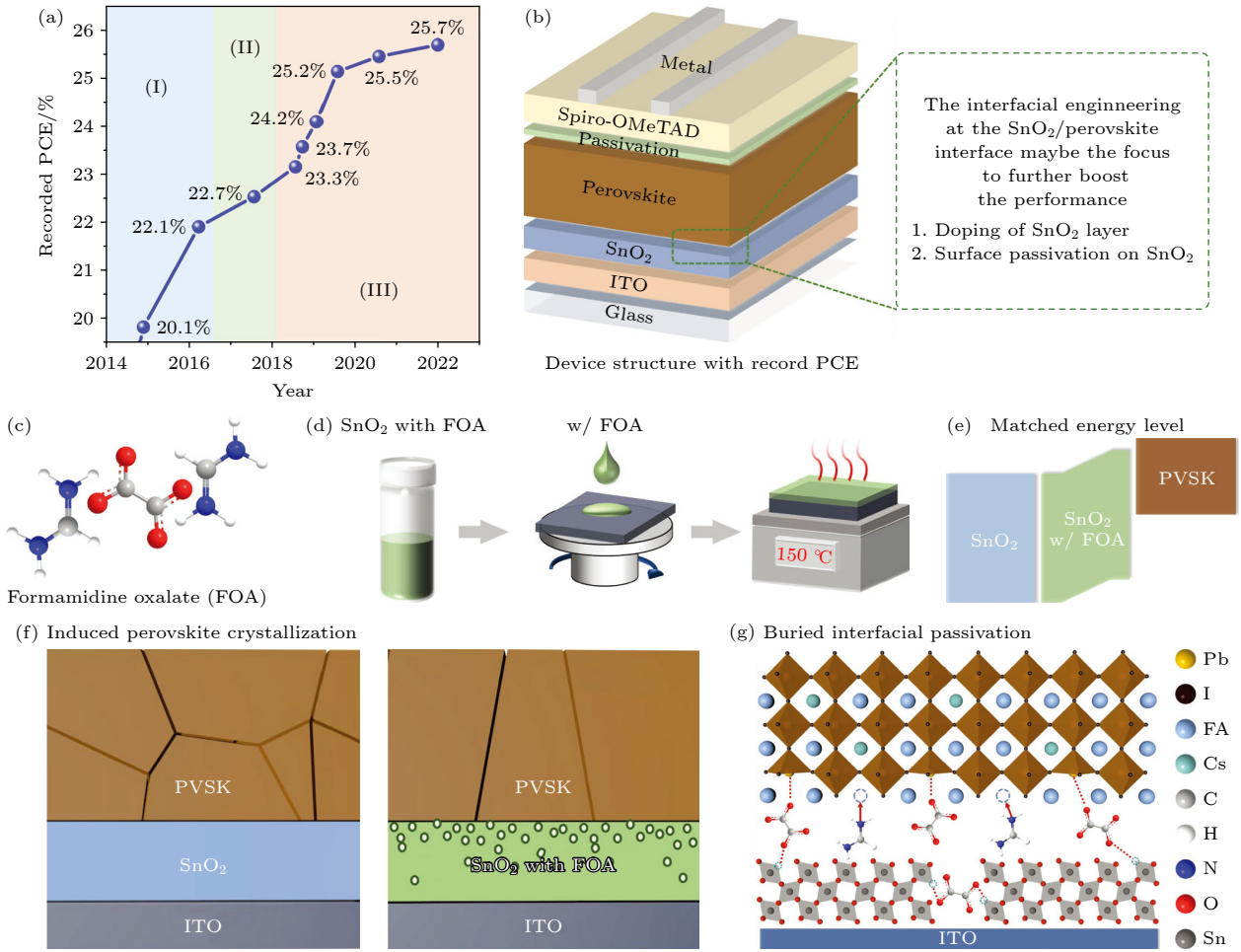


图 7 (a) PSC 中 PCE 创纪录的最新进展^[66]; (b) 具有记录 PCE 的器件结构和提高 PSC PCE 的接口工程^[66]; (c) FOA 的 3D 结构^[66]; (d) FOA 处理过程^[66]; (e) SnO₂, SnO₂-FOA 和钙钛矿的能级排列^[66]; (f) FOA 分布及其对上部钙钛矿晶体生长的调节^[66]; (g) FOA 在掩埋 SnO₂/钙钛矿界面处的钝化功能^[66]

Fig. 7. (a) Recent advances with the record PCE in PSCs^[66]; (b) the device structure with record PCE and the interface engineering boosting the PCE of PSCs^[66]; (c) the 3D structure of FOA^[66]; (d) the procedures of the FOA treatment^[66]; (e) energy level alignment of SnO₂, SnO₂-FOA, and perovskite^[66]; (f) distribution of FOA and its regulation for upper perovskite crystal growth^[66]; (g) the passivation function of FOA at the buried SnO₂/perovskite interface.^[66]

4.2 中间连接层 (隧穿层) 设计与优化

PTSC 的制作方式如图 8 所示, 中间连接层是叠层太阳能电池实现上下两侧电流传输的关键界面, 一般由透明导电氧化物薄膜 (TCO) 构成, 涉及材料包括氧化铟锡 (ITO)^[73]、掺氟氧化锡 (FTO)^[74]、掺杂铝氧化锌 (AZO)^[75] 等, 薄膜性能优劣将直接影响薄膜太阳能电池的效率及稳定性. TCO 层的设计初衷为减少光学反射以及纵向收集载流子, 而在 PTSC 的两端子路线中可直接作为中间隧穿层实现两侧电池的有效串联.

TCO 中的寄生吸收是阻止钙钛矿叠层太阳能电池 PCE 超过 30% 的主要障碍. 为减少此类损失, Aydin 等^[77] 在 4T 钙钛矿/晶硅叠层器件上, 通

用过 IZRO 替换商业 ITO 电极, 将太阳能电池效率从 23.3% 提高到 26.2%. TCO 沉积一般通过磁控溅射 (PVD) 或等离子体镀膜 (RPD) 进行, 已经有许多研究表明 RPD 对器件的损伤小于 PVD^[78,79], 但目前 PVD 技术较为成熟也更具有成本优势, 成为沉积 TCO 层的主流设备 (图 9(a)–(f)). 钙钛矿活性材料不耐高温, 在钙钛矿上方沉积 TCO 时需要考虑材料类型、溅射源能量及溅射参数等带来的溅射损失^[79,80], 损失机制如图 9(g), 为减轻 PVD 给钙钛矿晶体带来的损伤, 目前学界公认的方法是先沉积 SnO₂ 作为保护层^[76]. Härtel 等^[81] 提出了一种通过调整 TCO 溅射功率获得高效器件的方法, 该方法实现了无 SnO₂ 保护下 25.44% 的 PCE.

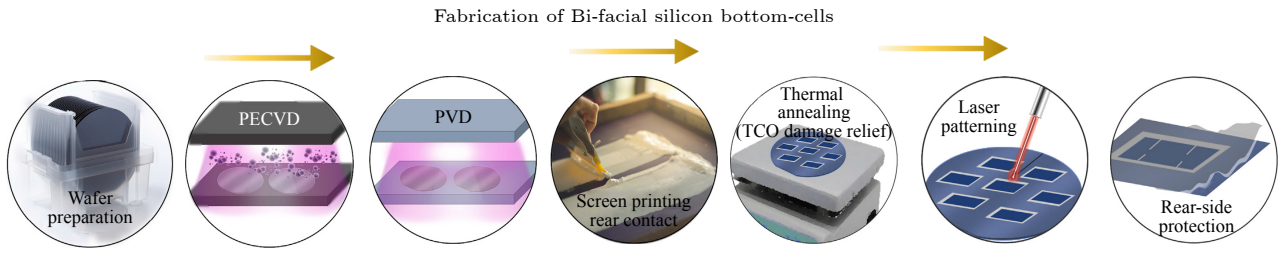


图 8 双面钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池的制作步骤^[89]

Fig. 8. Fabrication steps for bifacial perovskite/silicon tandem solar cells^[89].

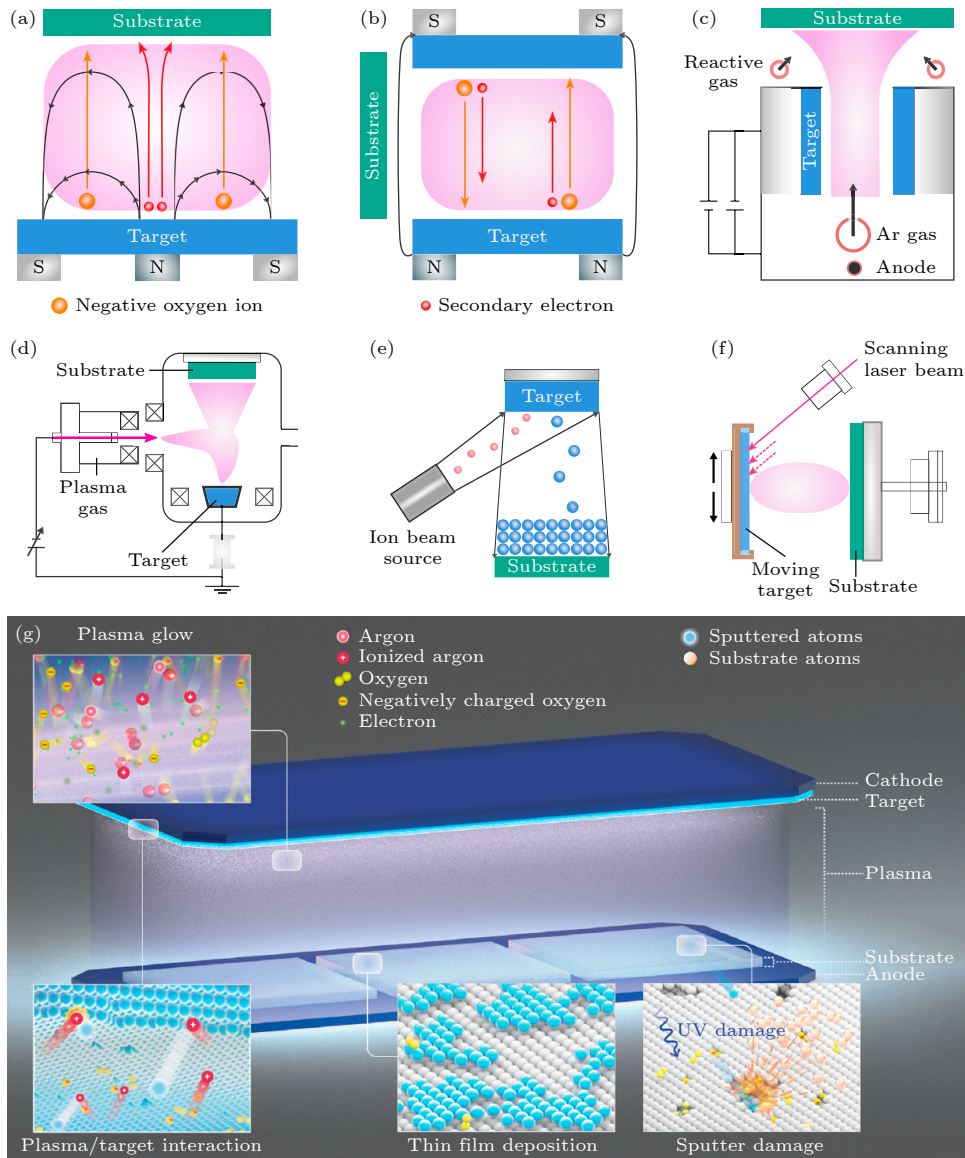


图 9 用于“软着陆”沉积的替代先进溅射设计和其他替代 PVD 技术^[76] (a) 磁控管溅射; (b) 面对靶溅射; (c) 气流溅射系统; (d) 反应性等等离子体沉积 (空心阴极离子镀); (e) 离子束溅射; (f) 脉冲激光沉积; (g) 氧化膜溅射沉积过程与底层基板的损坏机制
Fig. 9. Schematic demonstrations of alternative advanced sputtering designs and other alternative PVD techniques for “soft-landing” deposition^[76]: (a) Magnetron sputtering; (b) facing target sputtering; (c) gas-flow sputtering system; (d) reactive plasma deposition (hollow cathode ion plating); (e) ion beam sputtering; (f) pulsed laser deposition; (g) the sputtering process of oxide films and damage mechanisms of the underlying substrate during the sputter deposition.

由于钙钛矿和 c-Si 材料之间的折射率差异较大, 因此需要对中间层材料进行优化以抑制底部电

池中红外光的反射损失^[83]. 从光学角度来看, 底电极正面柔和的绒面结构或直接使用带有绒面结构

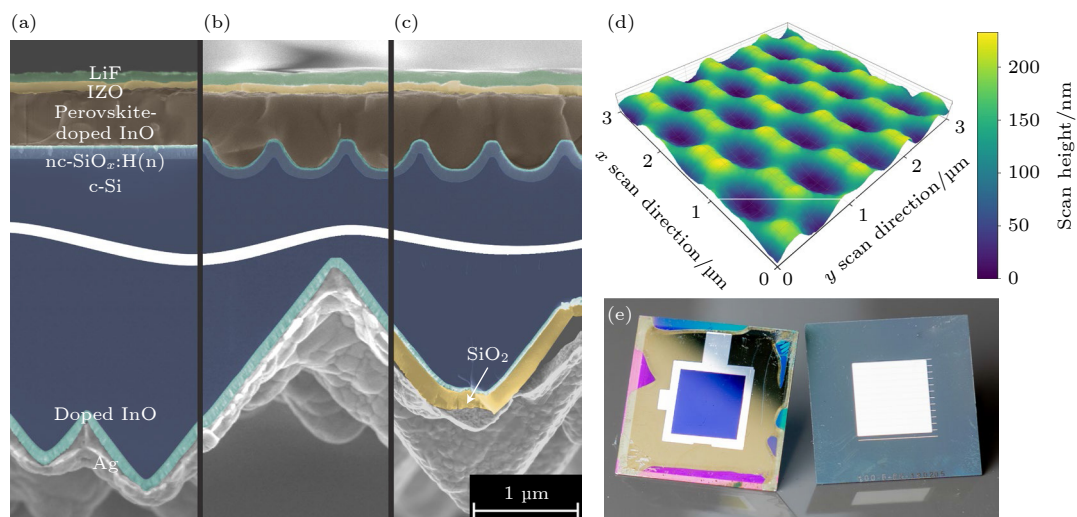


图 10 纳米绒面叠层结构与光学设计^[82], 叠层正面和背面的 SEM 横截面图 (a) 平面; (b) 纳米绒面; (c) 纳米绒面+RDBL 反射器; (d) 带有纳米绒面结构的晶硅底电池沉积接触层前的 AFM 图像; (e) 在约 1 cm^2 的正面银环 (左) 和背面的 RDBL (右) 之间的叠层器件

Fig. 10. Nanotextured PSTSC design^[82]. SEM cross-section micrographs of the front and rear side of (a) planar, (b) nanotextured, (c) nanotextured + RDBL PSTSCs; (d) AFM image of the nanostructured silicon bottom cell front side prior to the deposition of the contact layers^[82]; (e) photographs of the final PSTSC in between the front-side silver ring of approximately 1 cm^2 (left) and the RDBL on the rear side (right).

的中间层都可以改善钙钛矿/异质结叠层太阳能电池的光约束效应. Tockhorn 等^[82]对器件表面进行光学优化, 在晶硅底电池的背面设置带有介电缓冲层 (RDBL) 的反射器以减少近红外波长的寄生吸收, 如图 10. 结合晶硅底电池的柔和绒面实现了独立认证钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池 29.80% 的 PCE.

也有许多研究探索其他中间层作为两侧电池连接的优化方案及其可行性, Chapa 等^[84]在中间连接层位置用栅格金属触点代替 TCO, 并建立器件的完整光电模型应用于确定最优中间层, 使寄生吸收降低 30%. Sahli 等^[85]采用 nc-Si:H 层堆叠作为复合结作为中间层, 提出电池性能的显著差异是由于 ITO 与空穴传输层界面的不理想接触造成的. 在钙钛矿结晶所需的 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火步骤中, ITO 与空穴传输层在金字塔顶部和脊部分离 (图 11(c)), 局部地暴露 ITO, SEM 图像中显示为明亮区域, 如图 11(c) 箭头表示. 相比之下, 用 nc-Si:H 作为中间层时, 叠层结构保形性更好, 如图 11(e), (f) 所示, 从而使叠层太阳能电池表现出更好的性能 $V_{\text{OC}} > 1.78 \text{ V}$ (以 ITO 为中间层的电池 $V_{\text{OC}} < 0.70 \text{ V}$), 最大功率点 (MPP) 处 PCE 达到 25.2%.

5 组件连接工艺与应用可行性

以 PTSC 制备过程为主线分别介绍 2T 和 4T

叠层太阳能电池组件制备与应用过程中可能会遇到的关键问题, 包括电池片连接工艺、电压电流调节以及性能检测等, 并分析每条路线的应用可行性.

5.1 两端子 2T 叠层太阳能电池组件

5.1.1 合成制备与检测

2T PTSC 制备首先需在硅片端进行制绒工艺的调节, 包括制绒温度、时间、制绒剂溶液配方与浓度调节等, 得到尺寸约为 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 的双面绒面晶硅. 制绒处理后硅片存在许多半饱和悬挂键, 为抑制悬挂键造成的界面稳定性问题, 异质结电池采用本征氢化非晶硅层进行钝化处理, 将悬挂键的密度从 10^{15} cm^{-2} 降低到 10^8 cm^{-2} , 有效地减少载流子的复合, 提升少子寿命^[86,87]. 再进入 PECVD 分别在硅片正反面沉积 5—10 nm 的氢化本征非晶硅 (a-Si:H(i)), 15—20 nm 的掺 P/B(磷/硼) 非晶硅 (a-Si:H(n/p)) 型氢化非晶硅层, 在非晶硅薄膜与晶硅衬底之间形成 p-n 异质结. 由于非晶硅层晶体呈无序结构, 电子与空穴迁徙率较低, 且横向导电性较差, 不利于两侧电池界面光生载流子的传输与收集, 因此使用 PVD 在硅片正面再沉积一层 75—80 nm 厚的 TCO, 并对沉积方式、溅射参数及沉积厚度进行调整与优化, 使其能够在一个较好的区间实现两侧电池内部载流子的有效传输.

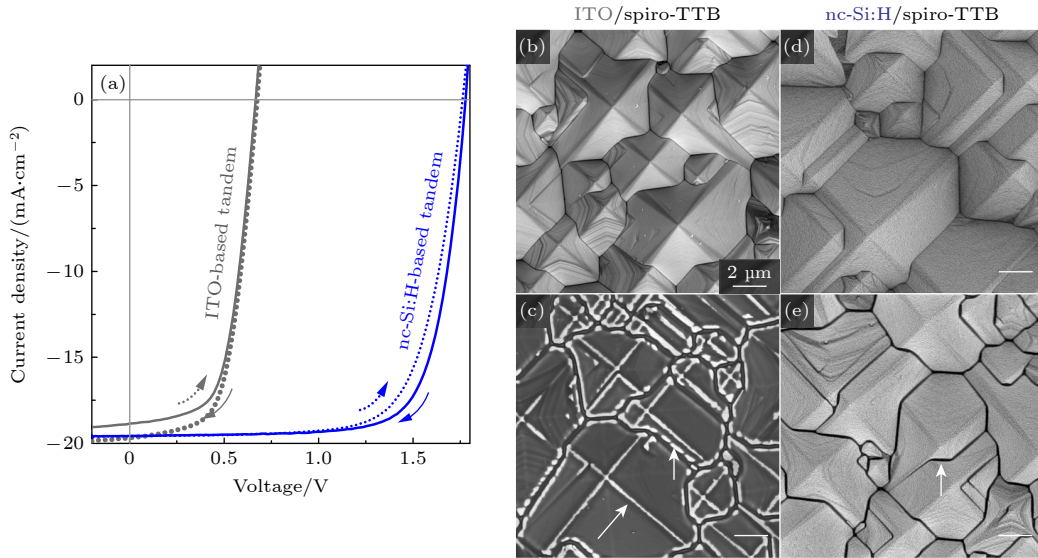


图 11 (a) 具有 ITO 中间层或 nc-Si:H 复合结的钙钛矿/异质结串联器件 $J-V$ 特性对比; 二次电子 SEM 图像, 单独沉积在 ITO 复合层上的 spiro-TTB(b), 以及退火后 SEM 对比 (c); 沉积在 nc-Si:H 复合结上的 spiro-TTB 的 SEM 图像 (d) 与 150 °C 下退火后 SEM (e) 对比^[85]

Fig. 11. Comparison between different recombination junctions. (a) $J-V$ characteristics of fully textured perovskite/SHJ tandem devices that feature either an ITO or an nc-Si:H recombination junction^[85]. Top view secondary electron SEM images of spiro-TTB as deposited on the ITO recombination layer (b) and after annealing at 150 °C (c). SEM images of spiro-TTB as deposited on the nc-Si:H recombination junction (d) and after annealing at 150 °C (e)^[85].

后续进行钙钛矿顶电池制备, 在晶硅电池受光面的 TCO 上方依次沉积载流子传输层和钙钛矿吸收层. 最后沉积金属电极, 由于目前异质结电池工艺中低温银浆的固化温度大概在 200 °C, 这个温度下钙钛矿层以及空穴传输层可能会存在较为严重的热解或性能损失, 因此金属电极目前主要通过蒸镀方式沉积, 但蒸镀存在靶材浪费以及大面积均匀性问题, 因此未来 2T 叠层仍需优化现有方法并探索新的电极沉积方式以实现电流的有效传输. 已有研究人员在攻克适用于钙钛矿/异质结叠层太阳能电池的超低温银浆, 这也是一条很有前景的技术路径.

光电流测量过程中所需的高偏压往往会引发严重的离子迁移, 导致测试结果不稳定且不准确, 有研究报道利用脉冲偏压技术成功实现高达 30 V 偏压下的稳定光电流-电压特性测量^[88]. 目前还没有适用于 2T PTSC 的电流密度-电压 ($J-V$) 的国际通用检测方式及标准. 两种可行的解决方案, 如图 12 所示. 第一种为常用于测量双面钙钛矿/晶硅太阳能电池的双光源检测, 光源固定为 1 个标准太阳光强, 后侧光源可调以模拟不同的后方辐照, 光谱过滤器可应用于模拟特定的有效反照率. 第二种是单光源, 太阳能电池在两个反射镜之间, 与设备形成 45°. 光源固定为 1 个太阳光强, 后视镜采用

强度滤光片和光谱滤光片, 分别模拟不同的后方强度和有效反照率^[89].

5.1.2 组件工艺连接与封装优化路线

为匹配两端叠层太阳能电池中的钙钛矿材料特性, 组件连接以及封装工艺问题更倾向于满足钙钛矿材料的低水透封装要求. 0BB 的低温组件连接工艺中无应力点胶智能互联技术与 PTSC 的工艺要求与适应条件非常契合. De Rose 等^[90]也介绍了用于 PTSC 的金属化和互连技术, 使用低温或超低温工艺进行金属化互连, 并比较无铅异质结太阳能电池的低温焊接与最先进的焊接工艺和导电粘合剂 (ECAs) 的互连方案. 证明这些方法在 PTSC 中的应用可行性, 具有实现大规模组件制造的发展潜力.

叠层太阳能电池设备稳定性差是其商业化道路上的一个关键挑战, 除了在钙钛矿太阳能电池层间结构方面进行稳定性设计与成分优化外, 研究学者也开发了许多防潮屏障技术以及坚固封装技术, 使用对外部环境具有高阻隔性能的合适材料和结构来保护 PTSC, 例如环氧树脂、丁基橡胶、陶瓷薄膜和二元合金等, 将钙钛矿有机太阳能电池与高湿环境有效隔离, 有望大幅提高叠层器件的光热稳定性^[91].

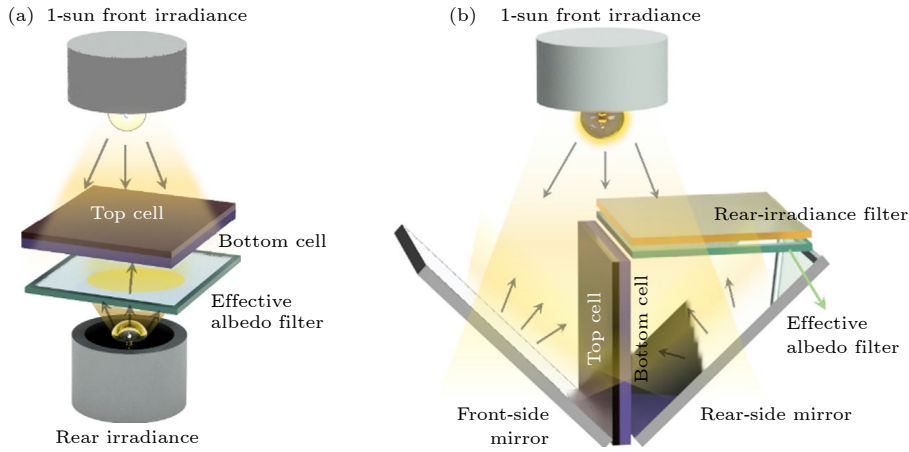


图 12 双面电池的双光源检测 (a) 与单光源反射检测 (b)^[89]

Fig. 12. Two possible setups for the characterization of the bifacial tandem: (a) Double light sources; (b) single light source^[89].

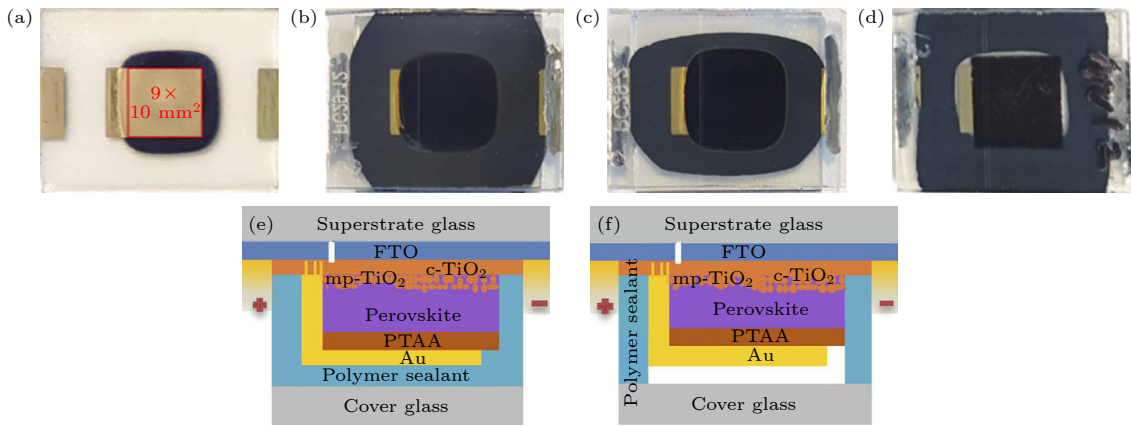


图 13 IEC 61215:2016 湿热和热循环试验用太阳能电池样品与结构图^[92] (a) 封装前电池的金属侧后表面 (红色方块表示有效区域); (b) 聚异丁烯 (PIB) 基聚合物的毯式封装; (c) 基于 PO 的毯式密封; (d) 基于 PIB 边缘密封后电池的“前”视图 (从上层看); (e), (f) 各封装方案的横截面

Fig. 13. Solar cells for IEC 61215:2016 damp heat and thermal cycling tests^[92]: (a) “Rear” or metal-side view of PSC before packaging (red square denotes the active area); (b) “front” view (from the superstrate side) of PSC after PIB-based blanket encapsulation; (c) PO-based blanket encapsulation; (d) PIB edge seal; (e), (f) illustrations of the cross sections of the respective encapsulation schemes (not to scale).

目前文献报道中常用到的封装方式是聚合物/玻璃堆封装, 如 De Bastiani 等^[30]为促进实验过程中的欧姆接触并防止电池降解, 将器件真空层压在两片玻璃之间, 并使用丁基橡胶作为边缘密封剂, 如图 13. 有效的聚异丁烯 (PIB) 基聚合物“毯子覆盖”封装方案也用于叠层组件密封, 通过创造加压环境防止钙钛矿分解, 经过湿热测试后基于 PIB 封装的电池在 1800 h 后没有降解, 超过 IEC 61215:2016 湿热和湿度冻结测试要求^[92].

5.2 四端子 4T 叠层太阳能电池

5.2.1 合成制备与检测

四端子机械叠层太阳能电池工艺较为简单, 由

于两个子电池完全独立, 可以实现分开制备后再叠加. 因此晶硅侧无需调整绒面, 可直接进行常规晶硅太阳能电池的制造. 钙钛矿侧也无需匹配晶硅顶层 TCO 的厚度、大小与面积, 可直接在导电玻璃上完成沉积, 面积较大时需用激光刻蚀将钙钛矿分成多个子电池, 但为了匹配晶硅电池电压, 需对后两道激光进行调整以串并联结合的方式实现与晶硅底电池的电压匹配.

5.2.2 工艺连接优化与封装

布局叠层太阳能电池的各大企业也积极在探索叠层太阳能电池的组件连接与封装方案, 协鑫光电通过在玻璃基底上沉积 n-i-p 正式结构的钙钛矿太阳能电池, 在组件封装过程中再将钙钛矿太阳能

电池底部的玻璃作为叠层组件的顶部玻璃,与传统 4T 叠层太阳能电池结构相比减轻组件重量的同时降低了生产成本. 大面积钙钛矿组件上的性能提升也较为显著, 1000 mm×2000 mm 的钙钛矿单结组件经中国计量科学研究院认证达到 18.04% 的光电转换效率, 279 mm×370 mm 的 4T 钙钛矿叠层组件认证效率也达到了 26.17%.

在组件连接工艺中, 4T 叠层路线需对晶硅电池和钙钛矿子电池数量与面积进行调整, 并设计串并联电路以匹配组件电压问题. 组件封装与两端子相同, 若上下两个电池组件完全独立的情况, 可以在异质结底电池中用原本的封装方案以实现成本降低. 中间连接层在四端子叠层结构的设计中可以更多地考虑电池组件的可维护性和可迭代性. 由于目前钙钛矿顶电池的运行稳定性普遍较短, 效率迭代过程也仍在进行, 因此在叠层太阳能电池发展过程中可考虑使用气隙对组件进行连接与光学分配优化, 在降低制备工艺的复杂性和成本的同时, 可在不影响底电池性能的前提下实现顶电池的拆卸与更换.

6 总结与展望

钙钛矿/异质结叠层太阳能电池的光电转换效率从 2016 年的 23.6% 迅速发展至如今的 33.9%, 已经远远超过了单晶硅太阳能电池的理论极限转换效率. 叠层太阳能电池稳定性虽已提升至几千小时, 但与晶硅太阳能电池相比还相差甚远. 此外, 钙钛矿/异质结叠层太阳能电池在尺寸放大过程中出现的效率锐减以及光热不稳定等问题, 都是制约其商业化的重要因素.

本文从两端子、四端子钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池的两种结构入手, 对叠层的顶电池材料优化、添加剂工程、底电池结构设计及组件互联技术优化等关键问题的研究进展进行了总结与展望. 重点阐述钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池各关键材料层的优化选型、钙钛矿带隙优化与离子迁移抑制、层间界面传输调控、底电池连接层优化及组件互联与封装方式优化. 钙钛矿/异质结叠层太阳能电池的潜力已毋庸置疑, 效率优势逐渐凸显, 器件的寿命也得到了长足的进步, 工业化的号角已经吹响, 但想要与市场主流的晶硅太阳能电池有一战之力, 仍有许多难题有待攻克, 我们认为, 在钙钛矿层的稳

定性问题得到根本性解决之前, 四端子叠层太阳能电池更容易实现产品迭代与工业化的效率提升.

参考文献

- [1] Lin H, Yang M, Ru X, Wang G, Yin S, Peng F, Hong C, Qu M, Lu J, Fang L, Han C, Procel P, Isabella O, Gao P, Li Z, Xu X 2023 *Nat. Energy* **8** 789
- [2] Yu J, Li J, Zhao Y, Lambertz A, Chen T, Duan W, Liu W, Yang X, Huang Y, Ding K 2021 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **224** 110993
- [3] Niewelt T, Steinhauser B, Richter A, Veith-Wolf B, Fell A, Hammann B, Grant N E, Black L, Tan J, Youssef A, Murphy J D, Schmidt J, Schubert M C, Glunz S W 2022 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **235** 111467
- [4] Yu W, Li F, Huang T, Li W, Wu T 2023 *The Innovation* **4** 100363
- [5] Aydin E, Allen T G, De Bastiani M, Xu L, Ávila J, Salvador M, Van Kerschaver E, De Wolf S 2020 *Nat. Energy* **5** 851
- [6] Liang T S, Pravettoni M, Deline C, Stein J S, Kopecek R, Singh J P, Luo W, Wang Y, Aberle A G, Khoo Y S 2019 *Energy Environ. Sci.* **12** 427
- [7] Haschke J, Seif J P, Riesen Y, Tomasi A, Cattin J, Tous L, Choulat P, Aleman M, Cornagliotti E, Uruena A, Russell R, Duerinckx F, Champlaud J, Levrat J, Abdallah A A, Aïssa B, Tabet N, Wyrsh N, Despeisse M, Szlufcik J, De Wolf S, Ballif C 2017 *Energy Environ. Sci.* **10** 1196
- [8] Boccard M, Ballif C 2020 *ACS Energy Lett.* **5** 1077
- [9] Green M A, Dunlop E D, Yoshita M, Kopidakis N, Bothe K, Siefer G, Hao X 2023 *Prog. Photovoltaics* **31** 651
- [10] Wang R, Huang T, Xue J, Tong J, Zhu K, Yang Y 2021 *Nat. Photonics* **15** 411
- [11] Lin X, Cui D, Luo X, Zhang C, Han Q, Wang Y, Han L 2020 *Energy Environ. Sci.* **13** 3823
- [12] Liu T, Chen K, Hu Q, Zhu R, Gong Q 2016 *Adv. Energy Mater.* **6** 1600457
- [13] Zhu H, Teale S, Lintangpradipto M N, Mahesh S, Chen B, McGehee M D, Sargent E H, Bakr O M 2023 *Nat. Rev. Mater.* **8** 569
- [14] Ugur E, Aydin E, Bastiani M D, Harrison G T, Yildirim B K, Teale S, Chen B, Liu J, Wang M, Seitkhan A, Babics M, Subbiah A S, Said A A, Azmi R, Rehman A u, Allen T G, Schulz P, Sargent E H, Laquai F, Wolf S D 2023 *Matter* **6** 2919
- [15] Sadegh F, Akin S, Moghadam M, Keshavarzi R, Mirkhani V, Ruiz - Preciado M A, Akman E, Zhang H, Amini M, Tangestaninejad S, Mohammadpoor - Baltork I, Graetzel M, Hagfeldt A, Tress W 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2102237
- [16] Sun Z, Chen X, He Y, Li J, Wang J, Yan H, Zhang Y 2022 *Adv. Energy Mater.* **12** 2200015
- [17] Duan L, Walter D, Chang N, Bullock J, Kang D, Phang S P, Weber K, White T, Macdonald D, Catchpole K, Shen H 2023 *Nat. Rev. Mater.* **8** 261
- [18] Chin X Y, Turky D, Steele J A, Tabean S, Eswara S, Mensi M, Fiala P, Wolff C M, Paracchino A, Artuk K, Jacobs D, Guesnay Q, Sahli F, Andreatta G, Boccard M, Jeangros Q, Ballif C 2023 *Science* **381** 59
- [19] Kim S, Trinh T T, Park J, Pham D P, Lee S, Do H B, Dang N N, Dao V A, Kim J, Yi J 2021 *Sci. Rep.* **11** 15524
- [20] Jaysankar M, Raul B A L, Bastos J, Burgess C, Weijtsens C, Creatore M, Aernouts T, Kuang Y, Gehlhaar R, Hadipour A,

- Poortmans J 2018 *ACS Energy Lett.* **4** 259
- [21] Hou F, Yan L, Shi B, Chen J, Zhu S, Ren Q, An S, Zhou Z, Ren H, Wei C, Huang Q, Hou G, Chen X, Li Y, Ding Y, Wang G, Zhang D, Zhao Y, Zhang X 2019 *ACS Appl. Energy Mater.* **2** 243
- [22] Bush K A, Manzoor S, Frohna K, Yu Z J, Raiford J A, Palmstrom A F, Wang H P, Prasanna R, Bent S F, Holman Z C, McGehee M D 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 2173
- [23] Xu K, Al-Ashouri A, Peng Z W, Köhnen E, Hempel H, Akhundova F, Marquez J A, Tockhorn P, Shargaieva O, Ruske F, Zhang J, Dagar J, Stannowski B, Unold T, Abou-Ras D, Unger E, Korte L, Albrecht S 2022 *ACS Energy Lett.* **7** 3600
- [24] Chen B, Yu Z J, Manzoor S, Wang S, Weigand W, Yu Z, Yang G, Ni Z, Dai X, Holman Z C, Huang J 2020 *Joule* **4** 850
- [25] Xiao K, Lin Y H, Zhang M, Oliver R D J, Wang X, Liu Z, Luo X, Li J, Lai D, Luo H W, Lin R X, Xu J, Hou Y, Snaith H J, Tan H 2022 *Science* **376** 762
- [26] Deng Y, Zheng X, Bai Y, Wang Q, Zhao J, Huang J 2018 *Nat. Energy* **3** 560
- [27] Saki Z, Byranvand M M, Taghavinia N, Kedia M, Saliba M 2021 *Energy Environ. Sci.* **14** 5690
- [28] Li H, Zhou J, Tan L, Li M, Jiang C, Wang S, Zhao X, Liu Y, Zhang Y, Ye Y, Tress W, Yi C 2022 *Sci. Adv.* **8** eabo7422
- [29] Nguyen V S, Zimmermann I, Grépin E, Medjoubi K, Jutteau S, Donsanti F, Bruhat E, Duchatelet A, Berson S, Rousset J 2023 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **158** 107358
- [30] De Bastiani M, Mirabelli A J, Hou Y, Gota F, Aydin E, Allen T G, Troughton J, Subbiah A S, Isikgor F H, Liu J, Xu L, Chen B, Van Kerschaver E, Baran D, Fraboni B, Salvador M F, Paetzold U W, Sargent E H, De Wolf S 2021 *Nat. Energy* **6** 167
- [31] Farooq U, Ishaq M, Shah U A, Chen S, Zheng Z H, Azam M, Su Z H, Tang R, Fan P, Bai Y, Liang G X 2022 *Nano Energy* **92** 106710
- [32] Chen Z, Brocks G, Tao S, Bobbert P A 2021 *Nat. Commun.* **12** 2687
- [33] Draguta S, Sharia O, Yoon S J, Brennan M C, Morozov Y V, Manser J S, Kamat P V, Schneider W F, Kuno M 2017 *Nat. Commun.* **8** 200
- [34] Liu X, Luo D, Lu Z H, Yun J S, Saliba M, Seok S I, Zhang W 2023 *Nat. Rev. Chem.* **7** 462
- [35] Subbiah A S, Isikgor F H, Howells C T, De Bastiani M, Liu J, Aydin E, Furlan F, Allen T G, Xu F, Zhumagali S, Hoogland S, Sargent E H, McCulloch I, De Wolf S 2020 *ACS Energy Lett.* **5** 3034
- [36] Zhang X, Shen J X, Turiansky M E, Van de Walle C G 2021 *Nat. Mater.* **20** 971
- [37] Wei Q, Zhang Q, Xiang L, Zhang S, Liu J, Yang X, Ke Y, Ning Z 2021 *J. Phys. Chem. Lett.* **12** 6492
- [38] Yang G, Ni Z, Yu Z J, Larson B W, Yu Z, Chen B, Alasfour A, Xiao X, Luther J M, Holman Z C, Huang J 2022 *Nat. Photonics* **16** 588
- [39] Sun C, Wei J, Zhao J, Jiang Y, Wang Y, Hu H, Wang X, Zhang Y, Yuan M 2021 *Nanophotonics* **10** 2157
- [40] Zhang F, Tu B B, Yang S F, Fan K, Liu Z L, Xiong Z J, Zhang J, Li W, Huang H T, Yu C, Jen A K Y, Yao K 2023 *Adv. Mater.* **35** 2303139
- [41] Bi E, Chen H, Xie F, Wu Y, Chen W, Su Y, Islam A, Grätzel M, Yang X, Han L 2017 *Nat. Commun.* **8** 15330
- [42] Arora N, Dar M I, Hinderhofer A, Pellet N, Schreiber F, Zakeeruddin S M, Grätzel M 2017 *Science* **358** 768
- [43] Wang Y, Wu T, Barbaud J, Kong W, Cui D, Chen H, Yang X, Han L 2019 *Science* **365** 687
- [44] Nie W, Blancon J C, Neukirch A J, Appavoo K, Tsai H, Chhowalla M, Alam M A, Sfeir M Y, Katan C, Even J, Tretiak S, Crochet J J, Gupta G, Mohite A D 2016 *Nat. Commun.* **7** 11574
- [45] Zhao C, Chen B, Qiao X, Luan L, Lu K, Hu B 2015 *Adv. Energy Mater.* **5** 1500279
- [46] Wang L, Zhou H, Hu J, Huang B, Sun M, Dong B, Zheng G, Huang Y, Chen Y, Li L, Xu Z, Li N, Liu Z, Chen Q, Sun L, Yan C 2019 *Science* **363** 265
- [47] Zhang Y, Song Q Z, Liu G L, Chen Y H, Guo Z Y, Li N X, Niu X X, Qiu Z W, Zhou W T, Huang Z J, Zhu C, Zai H C, Ma S, Bai Y, Chen Q, Huang W C, Zhao Q, Zhou H P 2023 *Nat. Photonics* **17** 1066
- [48] Elshorbagy M H, López-Fraguas E, Chaudhry F A, Sánchez-Pena J M, Vergaz R, García-Cámara B 2020 *Sci. Rep.* **10** 2271
- [49] Khampa W, Bhoonancee C, Musikpan W, Passatorntaschakorn W, Rodwihok C, Kim H S, Gardchareon A, Ruankham P, Wongrataphisan D 2023 *Appl. Surf. Sci.* **637** 157933
- [50] Aydin E, De Bastiani M, De Wolf S 2019 *Adv. Mater.* **31** 1900428
- [51] Liu Z, Li H J, Chu Z J, Xia R, Wen J, Mo Y, Zhu H S, Luo H W, Zheng X T, Huang Z L, Luo X, Wang B, Zhang X L, Yang G T, Feng Z Q, Chen Y F, Kong W C, Gao J F, Tan H R 2024 *Adv. Mater.* **36** 2308370
- [52] Mariotti S, Köhnen K, Scheler F, Sveinbjörnsson K, Zimmermann L, Piot M, Yang F, Li B, Warby J, Musiienko A, Menzel D, Lang F, Keßler S, Levine L, Mantione D, Al-Ashouri A, Härtel M S, Xu K, Cruz A, Kurpiers J, Wagner P, Köbler H, Li J, Magomedov A, Mecerreyes D, Unger E, Abate A, Stolterfoht M, Stannowski B, Schlattmann R, Korte L, Albrecht S 2023 *Science* **381** 63
- [53] Liu J, Bastiani M D, Aydin E, Harrison G T, Gao Y, Pradhan R R, Eswaran M K, Mandal M, Yan W, Seitkhan A, Babics M, Subbiah A S, Ugur E, Xu F, Xu L, Wang M, Rehman A, Razzaq A, Kang J, Azmi R, Said A A, Isikgor F H, Allen T G, Andrienko D, Schwingenschlögl U, Laquai F, De Wolf S 2022 *Science* **377** 302
- [54] Zheng J, Wang G, Duan W, Mahmud M A, Yi H, Xu C, Lambert A, Bremner S, Ding K, Huang S, Ho-Baillie A W Y 2022 *ACS Energy Lett.* **7** 3003
- [55] Dagar J, Fenske M, Al-Ashouri A, Schultz C, Li B, Köbler H, Munir R, Parmasivam G, Li J, Levine I, Merdasa A, Kegelmann L, Näsström H, Marquez J A, Unold T, Többsens D M, Schlattmann R, Stegemann B, Abate A, Albrecht S, Unger E 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 13022
- [56] Al-Ashouri A, Köhnen E, Li B, Magomedov A, Hempel H, Caprioglio P, Márquez J A, Vilches A B M, Kasparavicius E, Smith J A, Phung N, Menzel D, Grischek M, Kegelmann L, Skroblin D, Gollwitzer C, Malinauskas T, Jošt M, Matic G, Rech B, Schlattmann R, Topic M, Korte L, Abate A, Stannowski B, Neher D, Stolterfoht M, Unold T, Getautis V, Albrecht S 2020 *Science* **370** 1300
- [57] Zhao Y, Heumueller T, Zhang J, Luo J, Kasian O, Langner S, Kupfer C, Liu B, Zhong Y, Elia J, Osvet A, Wu J, Liu C, Wan Z, Jia C, Li N, Hauch J, Brabec C J 2021 *Nat. Energy* **7** 144
- [58] Sarritzu V, Sestu N, Marongiu D, Chang X, Masi S, Rizzo A, Colella S, Quochi F, Saba M, Mura A, Bongiovanni G 2017 *Sci. Rep.* **7** 44629
- [59] Li Z, Sun X, Zheng X, Li B, Gao D, Zhang S, Wu X, Li S, Gong J, Luther J M, Li Z, Zhu Z 2023 *Science* **382** 284

- [60] Bai Y, Lin Y, Ren L, Shi X, Strounina E, Deng Y, Wang Q, Fang Y, Zheng X, Lin Y, Chen Z G, Du Y, Wang L, Huang J 2019 *ACS Energy Lett.* **4** 1231
- [61] Chang Q, Bao D, Chen B, Hu H, Chen X, Sun H, Lam Y M, Zhu J X, Zhao D, Chia E E M 2022 *Commun. Phys.* **5** 187
- [62] Peng W, Mao K, Cai F, Meng H, Zhu Z, Li T, Yuan S, Xu Z, Feng X, Xu J, Michael D. McGehee, Xu J 2023 *Science* **379** 683
- [63] Wu W Q, Yang Z, Rudd P N, Shao Y, Dai X, Wei H, Zhao J, Fang Y, Wang Q, Liu Y, Deng Y, Xiao X, Feng Y, Huang J 2019 *Sci. Adv.* **5** 8925
- [64] Hou Y, Aydin E, De Bastiani M, Xiao C, Isikgor F H, Xue D J, Chen B, Chen H, Bahrami B, Chowdhury A H, Johnston A, Baek S W, Huang Z, Wei M, Dong Y, Troughton J, Jalmood R, Mirabelli A J, Allen T G, Van Kerschaver E, Saidaminov M I, Baran D, Qiao Q, Zhu K, De Wolf S, Sargent E H 2020 *Science* **367** 1135
- [65] Su H, Lin X, Wang Y, Liu X, Qin Z, Shi Q, Han Q, Zhang Y, Han L 2022 *Sci. Chin. Chem.* **65** 1321
- [66] Ji X, Bi L, Fu Q, Li B, Wang J, Jeong S Y, Feng K, Ma S, Liao Q, Lin F R, Woo H Y, Lu L, Jen A K Y, Guo X 2023 *Adv. Mater.* **35** 2303665
- [67] Isikgor F H, Furlan F, Liu J, Ugur E, Eswaran M K, Subbiah A S, Yengel E, De Bastiani M, Harrison G T, Zhumagali S, Howells C T, Aydin E, Wang M, Gasparini N, Allen T G, Rehman A u, Van Kerschaver E, Baran D, McCulloch I, Anthopoulos T D, Schwingenschlögl U, Laquai F, De Wolf S 2021 *Joule* **5** 1566
- [68] Dou J, Ma Y, Niu X, Zhou W, Wei X, Dou J, Cui Z, Song Q, Song T, Zhou H, Zhu C, Bai Y, Chen Q 2024 *J. Energy Chem.* **88** 64
- [69] Duong T, Pham H, Kho T C, Phang P, Fong K C, Yan D, Yin Y, Peng J, Mahmud M A, Gharibzadeh S, Nejand B A, Hossain I M, Khan M R, Mozaffari N, Wu Y, Shen H, Zheng J, Mai H, Liang W, Samundsett C, Stocks M, McIntosh K, Andersson G G, Lemmer U, Richards B S, Paetzold U W, Ho-Ballie A, Liu Y, Macdonald D, Blakers A, Wong-Leung J, White T, Weber K, Catchpole K 2020 *Adv. Energy Mater.* **10** 1903553
- [70] Zhu L F, Xu Y Z, Zhang P P, Shi J J, Zhao Y H, Zhang H Y, Wu J H, Luo Y H, Li D M, Meng Q B 2017 *J. Mater. Chem. A* **5** 20874
- [71] Liu X, Chen Z L, Wang H, Zhang W Q, Dong H, Wang P X, Shao Y C 2024 *Chin. Phys. B* **33** 048101
- [72] De Bastiani M, Jalmood R, Liu J, Ossig C, Vlk A, Vegso K, Babics M, Isikgor F H, Selvin A S, Azmi R, Ugur E, Banerjee S, Mirabelli A J, Aydin E, Allen T G, Ur Rehman A, Van Kerschaver E, Siffalovic P, Stuckelberger M E, Ledinsky M, De Wolf S 2022 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2205557
- [73] Bush K A, Palmstrom A F, Yu Z J, Boccard M, Cheacharoen R, Mailoa J P, McMeekin D P, Hoyer R L Z, Bailie C D, Leijtens T, Peters I M, Minichetti M C, Rolston N, Prasanna R, Sofia S, Harwood D, Ma W, Moghadam F, Snaith H J, Buonassisi T, Holman Z C, Bent S F, McGehee M D 2017 *Nat. Energy* **2** 17009
- [74] Ghannam H, Bazin C, Chahboun A, Turmine M 2018 *CrystEngComm* **20** 6618
- [75] Fu F, Feurer T, Weiss Thomas P, Pisoni S, Avancini E, Andres C, Buecheler S, Tiwari Ayodhya N 2016 *Nat. Energy* **2** 16190
- [76] Aydin E, Altinkaya C, Smirnov Y, Yaqin M A, Zaroni K P S, Paliwal A, Firdaus Y, Allen T G, Anthopoulos T D, Bolink H J, Morales-Masis M, De Wolf S 2021 *Matter* **4** 3549
- [77] Aydin E, De Bastiani M, Yang X, Sajjad M, Aljamaan F, Smirnov Y, Hedhili M N, Liu W, Allen T G, Xu L, Van Kerschaver E, Morales-Masis M, Schwingenschlögl U, De Wolf S 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1901741
- [78] Wahl T, Hanisch J, Meier S, Schultes M, Ahlswede E 2018 *Org. Electron.* **54** 48
- [79] Werner J, Dubuis G, Walter A, Löper P, Moon S J, Nicolay S, Morales-Masis M, De Wolf S, Niesen B, Ballif C 2015 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **141** 407
- [80] Liu K, Chen B, Yu Z J, Wu Y, Huang Z, Jia X, Li C, Spronk D, Wang Z, Wang Z, Qu S, Holman Z C, Huang J 2022 *J. Mater. Chem. A* **10** 1343
- [81] Härtel M, Li B, Mariotti S, Wagner P, Ruske F, Albrecht S, Szyszka B 2023 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **252** 112180
- [82] Tockhorn P, Sutter J, Cruz A, Wagner P, Jäger K, Yoo D, Lang F, Grischek M, Li B, Li J, Shargaieva O, Unger E, Al-Ashouri A, Köhnen E, Stolterfoht M, Neher D, Schlatmann R, Rech B, Stannowski B, Albrecht S, Becker C 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 1214
- [83] Yamamoto K, Mishima R, Uzu H, Adachi D 2023 *Jpn. J. Appl. Phys.* **62** Sk1021
- [84] Chapa M, Alexandre M F, Mendes M J, Águas H, Fortunato E, Martins R 2019 *ACS Appl. Energy Mater.* **2** 3979
- [85] Sahli F, Werner J, Kamino B A, Bräuninger M, Momard R, Paviet-Salomon B, Barraud L, Ding L, Diaz Leon J J, Sacchetto D, Cattaneo G, Despeisse M, Boccard M, Nicolay S, Jeangros Q, Niesen B, Ballif C 2018 *Nat. Mater.* **17** 820
- [86] Battaglia C, Cuevas A, De Wolf S 2016 *Energy Environ. Sci.* **9** 1552
- [87] Eugene A. Irene R G 1987 *Appl. Surf. Sci.* **30** 1
- [88] Wang Q, Yan L L, Chen B B, Li R J, Wang S L, Wang P Y, Huang Q, Xu S Z, Hou G F, Chen X L, Li Y L, Ding Y, Zhang D K, Wang G C, Zhao Y, Zhang X D 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 057802 (in Chinese) [王其, 延玲玲, 陈兵兵, 李仁杰, 王三龙, 王鹏阳, 黄茜, 许盛之, 侯国付, 陈新亮, 李跃龙, 丁毅, 张德坤, 王广才, 赵颖, 张晓丹 2021 物理学报 **70** 057802]
- [89] De Bastiani M, Subbiah A S, Babics M, Ugur E, Xu L, Liu J, Allen T G, Aydin E, De Wolf S 2022 *Joule* **6** 1431
- [90] De Rose A, Erath D, Nikitina V, Schube J, Güldali D, Minat Ä, Rößler T, Richter A, Kirner S, Kraft A, Lorenz A 2023 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **261** 112515
- [91] Chu Q Q, Sun Z, Wang D, Cheng B, Wang H, Wong C P, Fang B 2023 *Matter* **6** 3838
- [92] Shi L, Bucknall M P, Young T L, Zhang M, Hu L, Bing J, Lee D S, Kim J, Wu T, Takamura N, McKenzie D R, Huang S, Green M A, Ho-Baillie A W Y 2020 *Science* **368** 1328

REVIEW

Key issues and solutions affecting efficiency and stability of perovskite/heterojunction tandem solar cells

Yao Mei-Ling¹⁾ Liao Ji-Xing¹⁾ Lu Hao-Feng^{1)†} Huang Qiang¹⁾
Cui Yan-Feng¹⁾ Li Xiang¹⁾ Yang Xue-Ying²⁾ Bai Yang^{2)‡}

1) (*Cannovation Low Carbon New Energy Technology Co., Ltd, Changzhou 213000, China*)

2) (*Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518000, China*)

(Received 18 December 2023; revised manuscript received 29 January 2024)

Abstract

Efficient and stable perovskite/heterojunction tandem solar cells (PTSC) are a direction of joint exploration in both academia and industry. Achieving efficient solar energy utilization by assembling structural layers with different bandgaps in an optical sequence is the original design strategy for PTSC. Through the reasonable distribution of the absorption spectra of each layer, the photoelectric conversion efficiency (PCE) of PTSC can theoretically be increased to more than 40%. At present, the efficiency advantage of small-area PTSC is well-established, but there are still many challenges in the commercialization of solar cell efficiency and stability. Therefore, in this work, the two-terminal (2T) and four-terminal (4T) stacking methods are regarded as the main structural routes, and the optimal design of the key structural layers of PTSC, bandgap adjustment, additive regulation, optimization of interlayer transport, and optimization of the module interconnection and encapsulation methods are focused on. Based on the existing research results, the key problems and solutions affecting the efficiency and stability of PTSC are summarized and outlooked, aiming to provide directional solutions to the key problems in the structural design of PTSC. In addition, from the application perspective, it is proposed that before the stability problem of the perovskite is fundamentally solved, the 4T PTSC is more likely to achieve product iteration and industrial efficiency improvement, with the expectation of taking the lead in commercialization. This work emphasizes the popularization and practical application of commercialization, with a perspective that is more in line with the market trend and close to the industrial demand, and is expected to provide an important reference for the commercialization of PTSC in the academic circles.

Keywords: perovskite materials, heterojunction solar cell, two terminal and four terminal tandem structure, commercialization process

PACS: 88.40.hj, 88.40.jp, 73.40.Lq, 84.60.Jt

DOI: [10.7498/aps.73.20231977](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231977)

† Corresponding author. E-mail: luhf@cando-solar.com

‡ Corresponding author. E-mail: y.bai@siat.ac.cn

影响钙钛矿/异质结叠层太阳能电池效率及稳定性的关键问题与解决方法

姚美灵 廖纪星 逯好峰 黄强 崔艳峰 李翔 杨雪莹 白杨

Key issues and solutions affecting efficiency and stability of perovskite/heterojunction tandem solar cells

Yao Mei-Ling Liao Ji-Xing Lu Hao-Feng Huang Qiang Cui Yan-Feng Li Xiang Yang Xue-Ying Bai Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 088801 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231977

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231977>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钙钛矿/硅异质结叠层太阳能电池: 光学模拟的研究进展

Perovskite/silicon heterojunction tandem solar cells: Advances in optical simulation

物理学报. 2021, 70(5): 057802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201585>

钙钛矿/硅叠层太阳能电池中平面a-Si:H/c-Si异质结底电池的钝化优化及性能提高

Passivation optimization and performance improvement of planar a-Si:H/c-Si heterojunction cells in perovskite/silicon tandem solar cells

物理学报. 2019, 68(2): 028101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181759>

高效无空穴传输层碳基钙钛矿太阳能电池的制备与性能研究

Preparation and performance of high-efficient hole-transport-material-free carbon based perovskite solar cells

物理学报. 2018, 67(22): 228801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181457>

基于双层电子传输层钙钛矿太阳能电池的物理机制

Physical mechanism of perovskite solar cell based on double electron transport layer

物理学报. 2022, 71(20): 208802 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220725>

喷墨打印钙钛矿太阳能电池研究进展与展望

Inkjet printed perovskite solar cells: progress and prospects

物理学报. 2019, 68(15): 158807 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190302>

吸收层离子掺杂提高有机无机杂化钙钛矿太阳能电池效率及稳定性

Improving efficiency and stability of organic-inorganic hybrid perovskite solar cells by absorption layer ion doping

物理学报. 2021, 70(20): 206801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210836>