

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-14

反式钙钛矿太阳能电池氧化物埋底界面层研究进展

郑焜元¹, 陈姝敏², 崔义乾², 周 倩^{1,*}, 谭新玉^{1,2*}

(1. 三峡大学 材料与化工学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 荆楚理工学院, 湖北 荆门 448000)

摘要: 钙钛矿太阳能电池因光电转换效率提升迅速、制备工艺灵活而受到广泛关注, 其中反式结构(p-i-n型)具有可低温制备、迟滞效应较小、运行稳定性较好及与叠层器件适配性强等优势。随着器件效率不断提高, 空穴传输层与钙钛矿层之间的埋底界面逐渐成为影响效率和稳定性的关键区域。该界面影响钙钛矿薄膜成核生长、缺陷分布、能级匹配、载流子提取及非辐射复合过程, 因此需要通过引入功能层进行调控。氧化物材料具备良好的化学稳定性、界面能级适配性和表面可功能化特征, 能够改善埋底润湿性、调节界面接触、钝化界面缺陷并提升器件稳定性。本文综述反式钙钛矿太阳能电池氧化物基埋底界面层的研究进展, 重点分析氧化铝和氧化硅在多孔绝缘接触、固定电荷钝化、局域介电接触、光学调控、应力缓释及复合功能化等方面的作用, 对其他氧化物界面层仅作简要提及。

关键词: 反式钙钛矿太阳电池; 埋底界面; 氧化物功能层; 氧化铝; 氧化硅; 界面调控

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260200

CSTR: 32170.14.CJL.20260200

Research Progress of Oxide-Based Buried Interfacial Layers in Inverted Perovskite Solar Cells

ZHENG Kunyuan¹, CHEN Shumin², CUI Yiqian², ZHOU Qian^{1*}, TAN Xinyu^{1,2*}

(1. College of Materials and Chemical Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, China)

* Corresponding Author, E-mail: tanxin@ctgu.edu.cn

Abstract: Perovskite solar cells have attracted extensive attention owing to their rapidly increasing power conversion efficiency and solution processability. Among various device architectures, inverted p-i-n structures offer distinct advantages, including low-temperature processing, negligible hysteresis, superior operational stability, and excellent compatibility with tandem devices. As device efficiency continues to advance, the buried interface between the hole transport layer and the perovskite layer has gradually become a critical region affecting both efficiency and stability. This interface strongly affects perovskite nucleation and crystal growth, defect distribution, energy level alignment, charge extraction, and non-radiative recombination, highlighting the necessity of functional interfacial engineering. Oxide materials, featuring excellent chemical stability, favorable interfacial energy level alignment, and tunable surface functionalities, can improve wettability at the buried interface, optimize interfacial contact, passivate interfacial defects, and enhance device stability. This review summarizes recent progress in oxide-based buried interfacial layers for inverted perovskite solar cells, with emphasis on the roles of aluminum oxide and silicon oxide in porous insulating interfacial contacts, fixed-charge passivation, localized dielectric contacts, optical management, stress relaxation, and multifunctional integration. Other oxide interfacial layers, such as hafnium oxide, magnesium oxide, and zirconium oxide, are briefly discussed.

收稿日期: 2026-07-01; 修订日期: 2026-07-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(62305141)

Supported by Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (62305141)

Keywords: inverted perovskite solar cells; buried interface; oxide functional layer; aluminum oxide; silicon oxide; interface regulation

1 引 言

太阳能电池是太阳能利用中较为直接且具备规模化应用基础的技术之一。经过长期发展,晶体硅电池已具备成熟的产业体系,并在商业光伏市场中占据主导地位。然而,晶硅电池进一步提效仍受工艺复杂度、制备能耗和成本等因素限制,新型薄膜光伏材料因此受到关注^[1-2]。在新型薄膜光伏材料中,钙钛矿材料兼具强光吸收、载流子输运能力强、带隙可调和低温制备等特点,不仅可用于构筑高效单结电池,也可作为与晶硅电池匹配的叠层顶电池^[3-6]。在组分设计、成膜技术和界面调控等方面持续优化的推动下,钙钛矿太阳能电池的光电转换效率已快速提升^[7-10]。其中,p-i-n结构具有低温制备、迟滞小和运行稳定性较好等优势,并与柔性器件及钙钛矿/硅叠层电池具有良好的工艺适配性,已成为高效单结器件的重要结构之一,也是叠层电池中的关键组成部分^[11-14]。

在反式器件中,空穴传输层与钙钛矿吸光层之间的埋底界面直接影响前驱体溶液铺展、钙钛矿成核结晶、底部缺陷分布和载流子输运^[15]。若埋底接触不理想,界面处容易出现局部空隙、覆盖不均、能级失配和应力集中等问题,进而诱发非辐射复合和电荷传输损失,最终导致开路电压、填充因子和长期稳定性下降。在高效反式器件中,自组装单分子层(self-assembled monolayers, SAMs)因厚度薄、寄生吸收低、偶极可调和能级调节能力强,已成为常用的空穴传输层。然而,SAMs的组装质量容易受到分子间作用力、基底结合位点、溶剂环境和成膜条件影响。部分SAM分子在溶液

中可能发生预聚集,成膜后也可能出现覆盖不足或取向不均等问题^[16]。在后续钙钛矿前驱液沉积过程中,以DMF和DMSO为代表的强极性溶剂可能扰动弱结合位点上的SAM分子,使局部锚定和界面连续性受到影响^[17]。若SAM覆盖不够致密,这些缺陷难以被充分屏蔽,容易引发漏电流和非辐射复合^[18]。此外,氧化镍(NiO_x)作为目前反式钙钛矿电池中商业化应用最成熟的无机p型空穴传输层,凭借高空穴迁移率、合适的价带能级和优异的热稳定性,已支撑单结器件认证效率突破26%并进入中试量产阶段,其表面通常存在氧空位、未配位金属离子等缺陷,且具有显著的表面吸水性,易在环境中吸附水分子并解离生成化学反应性羟基,不仅可能与钙钛矿发生界面氧化还原反应生成 NiI_2 和 I_2 等副产物,羟基还会直接诱发钙钛矿的质子化分解,加速界面降解。由此可见,仅依赖有机空穴传输层仍难以充分解决埋底界面的覆盖、缺陷和稳定性问题,引入更可控的埋底功能层进行辅助调控已成为重要思路。

在这一背景下,化学稳定、表面易修饰且具有绝缘钝化特征的氧化物材料,为反式器件埋底界面调控提供了新的选择。氧化物埋底层通常引入于空穴传输层与钙钛矿吸光层之间,可通过改善基底润湿、调控钙钛矿成核结晶,钝化界面缺陷和释放应力等方式,降低非辐射复合并提升器件稳定性。同时,部分绝缘氧化物在适当厚度或局域分布条件下,可形成局部钝化接触,在抑制界面复合的同时尽量避免对空穴提取造成明显阻碍^[19-22]。如图1所示,氧化物埋底层的作用涉及润湿与成膜、缺陷钝化、能级匹配、电荷提取、抑制复合和稳定性提升等多个方面。

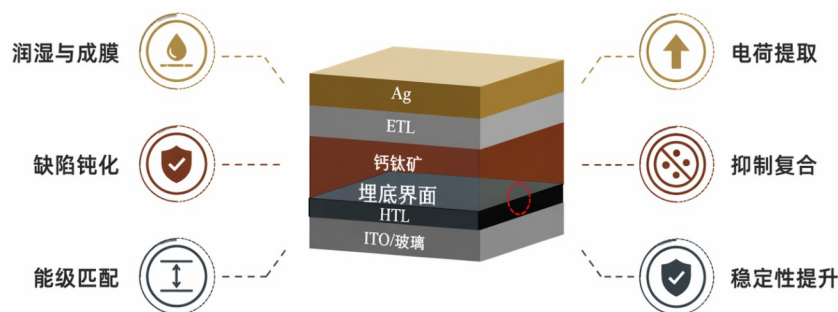


图1 反式器件埋底界面调控示意图

Fig.1 Schematic diagram of buried substrate interface regulation for inverted devices

其中, Al_2O_3 和 SiO_2 是目前研究较为集中的两类代表性氧化物材料^[23]。 Al_2O_3 主要用于多孔绝缘接触、界面润湿改善^[21]和区域选择性调控^[24-26]; SiO_2 则更多用于局域介电调控、光学管理、界面支撑和表面功能化复合^[27-30]。此外, HfO_2 、 MgO 和 ZrO_2 等氧化物也在分子锚定、离子阻挡、缓冲保护和绝缘桥接等方面展现出应用潜力^[31-33]。本文重点围绕 Al_2O_3 和 SiO_2 两类核心氧化物埋底层展开, 系统梳理其代表性研究进展, 深入剖析其界面调控作用机制, 并讨论其界面调控作用机制和未来发展方向。

2 埋底界面调控概述

p-i-n 型钙钛矿太阳能电池的埋底界面是影响薄膜生长、能级衔接和载流子提取的重要区域。围绕这一界面, 后文将从空穴传输层的发展、埋底界面对薄膜和器件性能的影响, 以及氧化物埋底层的调控思路三个方面进行梳理。

2.1 反式器件空穴传输层的发展

p-i-n 型钙钛矿太阳能电池通常由透明导电电极、空穴传输层、钙钛矿吸光层、电子传输层和金属电极组成。由于空穴传输层位于器件底部, 其能级结构、表面润湿性和缺陷会影响空穴提取、前驱体溶液铺展和钙钛矿薄膜生长。早期反式器件多采用 PEDOT:PSS 作为空穴传输层, 该材料可低温成膜, 工艺简单, 但其酸性、吸湿性及能级匹配不足等问题会影响埋底界面稳定性, 不利于器件电压和长期稳定性的提升^[34-36]。为解决 PEDOT:PSS 的固有缺陷, PTAA、 NiO_x 等第二代空穴传输材料相继被开发用于构建更稳定的底部空穴选择接触。PTAA 具有较好的空穴传输能力, 但成本较高且表面偏疏水, 容易影响钙钛矿前驱体溶液的均匀铺展^[37]; NiO_x 具有较好的无机稳定性和空穴选择性, 但其表面氧空位、未配位金属离子及界面反应, 仍会导致复合损失^[38-41]。随着反式器件效率持续提升, 对界面损失控制的要求日益严苛, SAMs 作为第三代空穴传输材料逐渐成为高效单结器件的主流选择^[42]。SAMs 厚度薄、寄生吸收小, 分子结构和端基可调, 可通过分子偶极和界面相互作用优化能级排列与载流子提取, 有利于提高开路电压并降低界面损失。然而, SAMs 的覆盖完整性、分子排列有序性以及后续溶剂处理的耐受性, 仍会影响埋底界面和钙钛矿薄膜质量^[43]。因此, 在 SAM 或 NiO_x /SAM 底

部接触基础上引入功能层, 有望进一步改善反式器件埋底界面。

2.2 埋底界面对薄膜生长和器件性能的影响

钙钛矿薄膜的生长并非只是由体相结晶过程决定, 埋底界面也会从前驱体铺展和初始结晶产生直接影响^[44]。空穴传输层表面的润湿性、平整性和化学状态会改变成核位点分布及晶粒生长取向。均一、平整且接触良好的埋底界面, 有利于形成连续致密的钙钛矿薄膜, 并减少底部空隙和孔洞; 相反, 若界面润湿不足或局部接触不连续, 薄膜结晶过程中容易出现成核位点分布不均、晶粒生长取向分散和底部缺陷积累等问题^[45-46]。此外, 退火及后续工作条件下的热应力也会影响埋底区域的结构稳定性。钙钛矿与基底之间的热膨胀失配可能引发晶格应变、空隙和位错等结构缺陷, 并为离子迁移和界面退化提供通道^[47-48]。

埋底界面形成的结构差异还会进一步影响器件中的电荷提取与复合过程, 较低的界面缺陷密度通常有利于减少陷阱态捕获, 降低光生载流子在底部界面的非辐射复合概率。若埋底界面存在能级失配、缺陷态或接触不连续, 光生载流子容易在底部界面发生非辐射复合, 从而造成开路电压损失^[49]。在电荷传输方面, 界面接触不均会造成局部传输受阻, 缺陷或空隙区域也可能形成漏电路径, 使器件串联电阻升高或并联电阻降低, 进而影响填充因子和输出稳定性^[50]。因此, 较理想的埋底界面应具备合适的能级衔接、低缺陷密度和均匀连续的接触, 并尽量接近欧姆接触特征, 同时保持一定的机械稳定性。基于这些认识, 界面功能层的设计需要同时考虑成膜调控、缺陷钝化和接触优化, 以提升反式钙钛矿太阳能电池的效率、稳定性和性能重复性^[51]。

2.3 氧化物埋底层的材料特征与设计思路

氧化物材料在钙钛矿光伏中的应用最初并非作为传统意义上的电荷传输层, 而是凭借其优异的化学稳定性、结构调控能力和界面修饰作用参与器件构筑。早期研究表明, 氧化物介电层可通过空间限域、界面缺陷调控和形貌优化等方式改善钙钛矿薄膜质量, 并逐渐发展为重要的界面调控策略。Lee 等在 2012 年提出介观超结构太阳能电池体系, 以介孔 Al_2O_3 作为惰性绝缘支架替代传统 n 型介孔 TiO_2 , 证明宽带隙氧化物虽不参与电荷传输, 但可通过空间限域作用支撑钙钛矿活性

层生长,并减少金属氧化物表面缺陷引起的界面复合损失,推动了绝缘氧化物在钙钛矿器件中的应用^[52]。随后,Ball等进一步发展了低温制备的 Al_2O_3 介孔支架,发现绝缘氧化物不仅能够改善基底表面形貌和薄膜覆盖情况,还可通过调节界面物化性质影响钙钛矿结晶动力学,提高薄膜质量^[53]。随着反式钙钛矿电池的发展,Chen等将介孔 Al_2O_3 引入 NiO 基反式器件中,通过构建 $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合埋底界面,利用 Al_2O_3 的绝缘特性减少底部电极与钙钛矿层之间的直接接触,降低界面漏电流和非辐射复合,为氧化物埋底界面层在反式器件中的应用提供了重要基础^[54]。

基于埋底界面对成膜和电荷运输的影响,功能层材料需要同时满足界面稳定、缺陷钝化和选择性载流子传输等要求。 Al_2O_3 、 SiO_2 等宽带隙绝缘氧化物通常具有良好的化学稳定性、较低电导率及优异的绝缘特性,其表面富含可进一步修饰的羟基或其他活性位点,可用于调控埋底界面的化学结合状态、润湿行为及电荷复合过程^[55-56]。在反式器件中,氧化物埋底层可通过局部绝缘阻隔和有效接触面积调控,降低底部界面的非辐射复

合损失^{错误:未找到引用源。},也可通过调节表面润湿性和粗糙度改善前驱体铺展与成核过程^[57]。

从设计思路看,氧化物埋底层并非单纯用于界面阻隔,而是通过改善底部接触、调节结晶过程和降低界面复合来发挥作用。在常见一步法成膜过程中,溶剂挥发、反溶剂萃取和基底润湿性差异容易导致薄膜垂直方向上的结晶不均一,埋底区域因此更容易受到基底粗糙度和局部成核势垒等因素影响,进而形成底部空隙和缺陷富集^[58-59]。针对这些问题,氧化物纳米颗粒或超薄氧化物层可填补局部间隙、改善接触连续性并降低界面缺陷密度。同时, Al_2O_3 、 SiO_2 等材料还可通过固定电荷、局域介电环境或表面功能化,改变界面附近的载流子浓度分布,降低电子与空穴在缺陷区域的复合概率,从而减弱底部非辐射复合。通过表面接枝或复合改性引入氨基、巯基、氟基等基团后,氧化物埋底层还可增强对未配位 Pb^{2+} 、卤素空位等缺陷的作用,并进一步拓展到应力缓释、光学调控和叠层界面适配等方面^[27]。基于上述特征,不同氧化物埋底/界面层在功能定位上存在差异,典型氧化物及其代表性作用如图2所示。

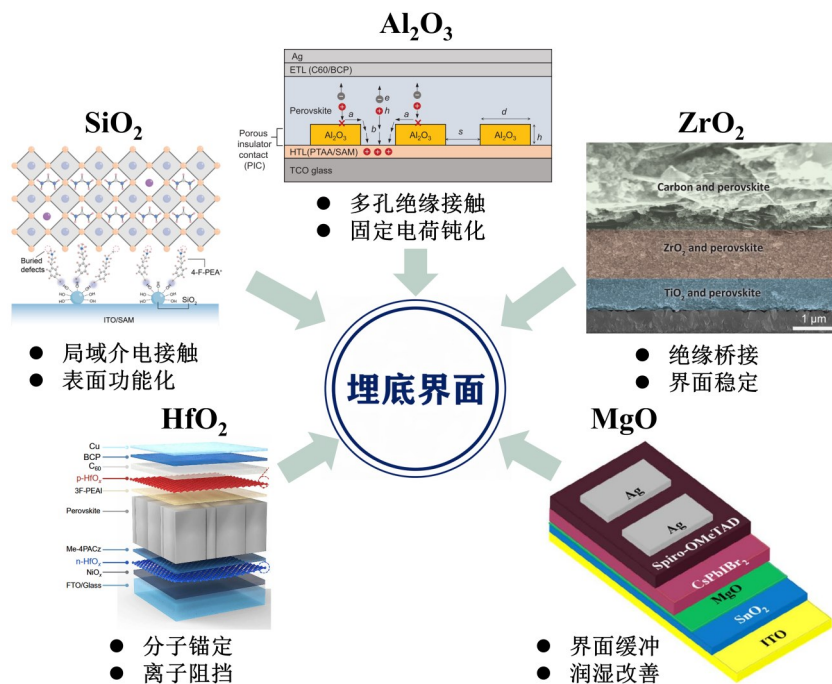


图2 典型氧化物埋底界面层及其主要功能示意图^[24,29,60,31-32]

Fig.2 Schematic diagram of typical oxide buried substrate interfacial layers and their main functions^[24,29,60,31-32]

3 氧化铝埋底层研究进展

Al_2O_3 具有化学稳定性好、带隙宽和电导较低等特点,是较早被引入反式钙钛矿太阳能电池埋底层

面调控的氧化物材料。由于 Al_2O_3 近似绝缘,相关研究多通过多孔结构、纳米颗粒分布或超薄原子层沉积(atomic layer deposition, ALD)层来控制其作用区域,以降低界面复合并避免明显阻碍电荷传

输。其中,多孔结构和纳米颗粒修饰多基于溶液法构筑,工艺简便且制备成本低;而ALD技术凭借自限制反应带来的原子级厚度控制能力,成为实现原子尺度界面精准调控的核心技术。超薄ALD- Al_2O_3 还可兼顾界面调控与稳定性提升。本节将从

多孔绝缘接触、纳米颗粒成膜调控和ALD- Al_2O_3 选择性界面调控三个方面进行梳理。围绕 Al_2O_3 埋底层的构筑方式和功能拓展,其界面调控策略已呈现出由局部绝缘接触向成膜调控、精细电荷调节及光学与电学协同设计逐步演进的趋势,如图3所示。

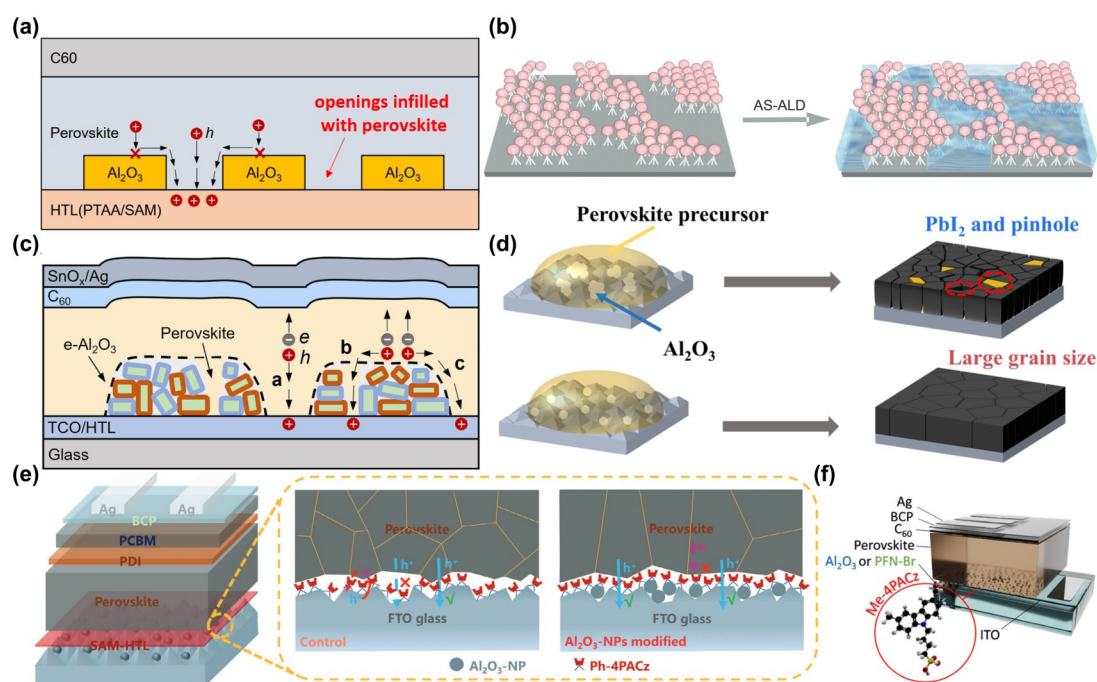


图3 Al_2O_3 埋底层界面调控策略的演进示意图^[24,22,26,25,61-62]

Fig.3 Schematic diagram of the evolution of interface regulation strategies with Al_2O_3 buried substrate layers^[24,22,26,25,61-62]

3.1 多孔绝缘接触与非辐射复合抑制

在反式钙钛矿太阳能电池中,埋底界面既负责空穴选择性提取,也容易因缺陷和接触不理想引发非辐射复合。低电导界面层可以降低复合损失,但若其阻隔作用过强,空穴提取将受到影响,器件容易在开路电压提高和填充因子维持之间出现权衡。因此, Al_2O_3 埋底层设计的关键并不是单纯增强界面阻隔,而是在降低非辐射复合的同时保留有效的空穴传输通道。

多孔绝缘接触为这一问题提供了新的解决思路。Peng等率先提出多孔 Al_2O_3 绝缘接触结构,通过调控 Al_2O_3 纳米片的岛状生长,在底部界面形成带有随机纳米尺度开口的绝缘区域。该结构通过 Al_2O_3 覆盖区域减少钙钛矿/空穴选择层的直接接触面积,并由钙钛矿填充的开口区域承担空穴提取,从而避免载流子必须穿过绝缘层进行隧穿传输。相关结果表明,约25%的 Al_2O_3 覆盖比例即可同时改善开路电压和填充因子,使p型接触处的表面复合速度明显降低,器件效率提升至25.5%,并在85°C热老化和连续光照最大功率点跟踪测试

中表现出更好的稳定性^[24]。

从机制上看,多孔 Al_2O_3 的优势并不只是化学钝化,而是通过调节底部界面的空间接触方式来降低复合损失。 Al_2O_3 分布区域削弱了钙钛矿与空穴选择层之间的直接复合接触,未覆盖的开口位置则保留载流子提取通道,使原本可能阻碍传输的绝缘材料在局部接触结构中发挥复合抑制作用^[24]。该团队后续进一步提出多孔微米级e- Al_2O_3 岛状结构,将 Al_2O_3 局部接触拓展为兼具界面钝化和光管理功能的埋底结构。该结构由表面修饰 Al_2O_3 纳米片经静电共组装形成,多孔通道允许钙钛矿渗入,使低折射率结构与有效电荷传输得以兼容。同时,e- Al_2O_3 可调节局部光场分布,增强光耦合和光子回收,在抑制非辐射复合的同时提升器件的光管理能力^[26]。由此可见,多孔 Al_2O_3 埋底层的功能已由单一的复合抑制,进一步拓展到接触面积调控和光场分布调节,为同时兼顾界面复合、电荷提取和光管理提供了新的设计思路。

3.2 Al₂O₃纳米颗粒调控润湿、成膜和界面均匀性

Al₂O₃纳米颗粒不仅可用于构筑多孔绝缘接触,也可通过调节润湿和成核过程改善埋底成膜质量。SAMs虽然具有寄生吸收低和能级可调等优势,但部分SAM表面偏疏水,钙钛矿前驱液在其表面容易出现润湿不足、液膜收缩和覆盖不连续等问题。对于喷涂等液滴沉积工艺,这种润湿不足会影响连续湿膜形成,进而使薄膜出现孔洞、间隙或厚度不均。Cassella等通过在Me-4PACz表面引入Al₂O₃纳米颗粒,改善了SAM表面的润湿性,使喷涂钙钛矿薄膜的连续性和均匀性得到提升^[63]。

在常规平面反式器件中,Al₂O₃纳米颗粒还可调节基底平整性和SAM组装质量。Pan等提出Al₂O₃-NPs/SAM/Al₂O₃-NPs的ASA结构,其中底部颗粒填补FTO微观沟槽,改善SAM分布均匀性;顶部颗粒提高基底平整性和润湿性,减少埋底空隙,并促进 α 相钙钛矿成核和薄膜结晶,使器件效率达到26.31%,认证效率为26.01%^[64]。这说明Al₂O₃纳米颗粒不只是改善前驱液润湿,还可同时调节基底平整性、SAM覆盖均匀性和钙钛矿结晶过程。

需要注意的是,Al₂O₃纳米颗粒自身的团聚会形成局部绝缘聚集体,破坏局部接触结构,进而影响空穴提取和钙钛矿结晶。Li等采用2-ATCI对Al₂O₃纳米颗粒进行分子引导改性,通过增强颗粒间静电排斥抑制团聚,同时增强SAM亲水性、钝化界面缺陷并释放晶格应变,使器件认证效率达到26.42%^[25]。在此基础上,Al₂O₃颗粒的应用进一步延伸到复杂基底适配和气相辅助成膜调控。一方面,Al₂O₃颗粒既可改善全纹理硅表面的湿膜覆盖和成核均匀性,促进溶液法钙钛矿在纹理表面的连续覆盖^[65]。另一方面,Al₂O₃颗粒也可作为局域异质成核位点,调节蒸镀无机前驱层的形貌和取向,促进后续有机卤盐扩散和前驱体充分转化^[21]。Perera等则表明,Al₂O₃纳米颗粒还可通过提高电子均匀性和捕获I₂延缓Me-4PACz器件老化^[19]。由此可见,Al₂O₃纳米颗粒的作用已从润湿和成膜调控,拓展到颗粒分散、复杂基底适配和界面稳定性提升。

3.3 ALD-Al₂O₃固定电荷钝化与区域选择性调控

与前述多孔结构和纳米颗粒修饰主要依赖溶液分散、旋涂和退火成膜不同,原子层沉积可通过自限制表面反应实现Al₂O₃超薄层的精确沉积,在

多个关键性能维度上与溶液法形成显著互补。在厚度控制方面,ALD可实现单原子层精度(~ 0.1 nm)的线性调控,能够精确制备1-5 nm的超薄钝化层;而溶液法受限于成膜机理,厚度通常难以控制在10 nm以下,且大面积器件边缘厚度偏差可达15%以上。在保形性方面,ALD的自限制反应特性使其能够实现三维结构的共形覆盖,完美贴合基底表面的微观起伏;而溶液法易产生台阶覆盖不全和边缘堆积问题,难以修饰复杂形貌的界面。在工艺重复性上,ALD批次间厚度偏差可控制在2%以内;但受限于沉积速率(通常 <0.1 nm/s)和设备投资成本,其大面积量产效率目前仍低于溶液法。低温ALD沉积的氧化铝薄层在部分文献中也写作AlO_x,以强调其非化学计量或无定形特征;因此,下文涉及具体研究时沿用相应文献中的表述。由于Al₂O₃具有低电导特性,这种厚度控制有助于在界面钝化与空穴提取之间取得平衡,而这也是常规溶液法较难精确实现的。Xiao等在NiO_x/SAM复合底接触上采用低温ALD引入Al₂O₃层,改善了界面接触和载流子复合行为^[66]。更具代表性的是,Yang等将ALD-AlO_x引入NiO_x/钙钛矿埋底界面,提出固定电荷诱导的物理钝化策略。从物理机制上看,该钝化效应可基于Shockley-Read-Hall(SRH)表面复合模型进行理解。界面非辐射复合速率与界面缺陷态密度以及电子、空穴浓度分布密切相关,而AlO_x中的负固定电荷可通过产生界面电场调节异质结附近的载流子浓度分布,使电子与空穴发生空间分离,从而降低界面电子-空穴复合概率,实现无需完全消除缺陷态的场效应钝化。实验测得,AlO_x中的负固定电荷密度约为 -7.43×10^{11} cm⁻²,可有效调节界面附近载流子分布,降低界面非辐射复合损失,使器件开路电压较对照组提升60 mV以上,光电转换效率达到22.5%^[23]。该固定电荷钝化效应高度依赖AlO_x层厚度均匀性,过厚会阻碍空穴传输,过薄则难以形成有效电荷调控作用,而ALD技术的精确厚度控制是实现该策略的关键。针对NiO_x/SAM体系中SAM覆盖不完整以及暴露位点易诱发界面复合的问题,Zhang等提出了区域选择性原子层沉积(AS-ALD)调控策略^[22]。该方法利用ALD自限制生长过程中不同表面的反应活性差异,通过暴露NiO_x表面羟基促进成核,而SAM烷基端基抑制沉积反应,实现超薄AlO_x在缺陷区域

的选择性生长,同时保留SAM区域的空穴传输能力。该策略可有效钝化界面缺陷,并通过 AlO_x 负固定电荷调节界面电场,抑制 Ni^{++} 相关副反应,改善埋底界面结晶过程,最终使器件冠军效率提升至26.41%,同时提高大面积组件性能和长期运行稳定性。与传统溶液法整体成膜方式相比,ALD基于表面反应选择性,可实现局域缺陷区域的沉积调控,为界面精准修饰提供了新的途径。

除埋底界面外,ALD- AlO_x 也可用于钙钛矿上界面调控。在反式器件中,钙钛矿与 C_{60} 之间的接触界面容易产生非辐射复合,并限制开路电压提升。Artuk等在钙钛矿/ C_{60} 界面引入ALD- AlO_x 保形超薄层,降低界面复合并提升开路电压,该策略由单结器件进一步拓展到钙钛矿/硅叠层电池^[67]。Fang等采用ALD- AlO_x /PDAI₂双层钝化策略,进一步调节钙钛矿/ C_{60} 界面能级、降低缺陷密度并抑制离子迁移,使工业硅底叠层器件获得较高效率和运行稳定性^[68]。此外,Kedia等从钙钛矿/空穴传输层界面出发,表明超薄ALD- Al_2O_3 可作为双向扩散阻挡层,抑制卤素外迁和传输层降解产物进入钙钛矿,从而缓解钙钛矿非晶化^[69]。

总体来看, Al_2O_3 埋底层的研究已从多孔绝缘接触和纳米颗粒成膜调控,发展到ALD尺度下的

固定电荷钝化与区域选择性沉积。溶液法制备的多孔结构与纳米颗粒更适用于界面接触调控与润湿性改善,工艺简便且易于规模化;而ALD技术则更适用于原子级精度的界面钝化与精细电荷调控,具备溶液法所不具备的高精度界面控制能力。二者技术优势互补,共同构成了多层次的界面调控技术体系。后续仍需关注 Al_2O_3 低电导特性带来的传输限制,在复合抑制和空穴提取之间取得平衡。在此基础上, SiO_2 由于表面硅羟基丰富、颗粒结构易调和功能化空间较大,也逐渐被用于埋底填充、应力缓释及复合功能界面构筑。

4 氧化硅埋底层研究进展

SiO_2 具有制备方法成熟、成本较低、颗粒尺寸可调 and 表面易修饰等特点,是近年来用于埋底界面调控的一类重要氧化物材料。相比 Al_2O_3 在多孔绝缘接触和固定电荷调控方面的代表性应用, SiO_2 更常依托颗粒堆积、介孔骨架和表面功能化调节底部接触形貌,并利用其良好的化学稳定性、光学透明性和表面可修饰特征实现界面优化。其表面丰富的硅羟基也便于进一步引入功能基团,从而将作用由局域介电接触拓展到结构支撑、应力缓释和表面功能化协同设计。图4总结了不同

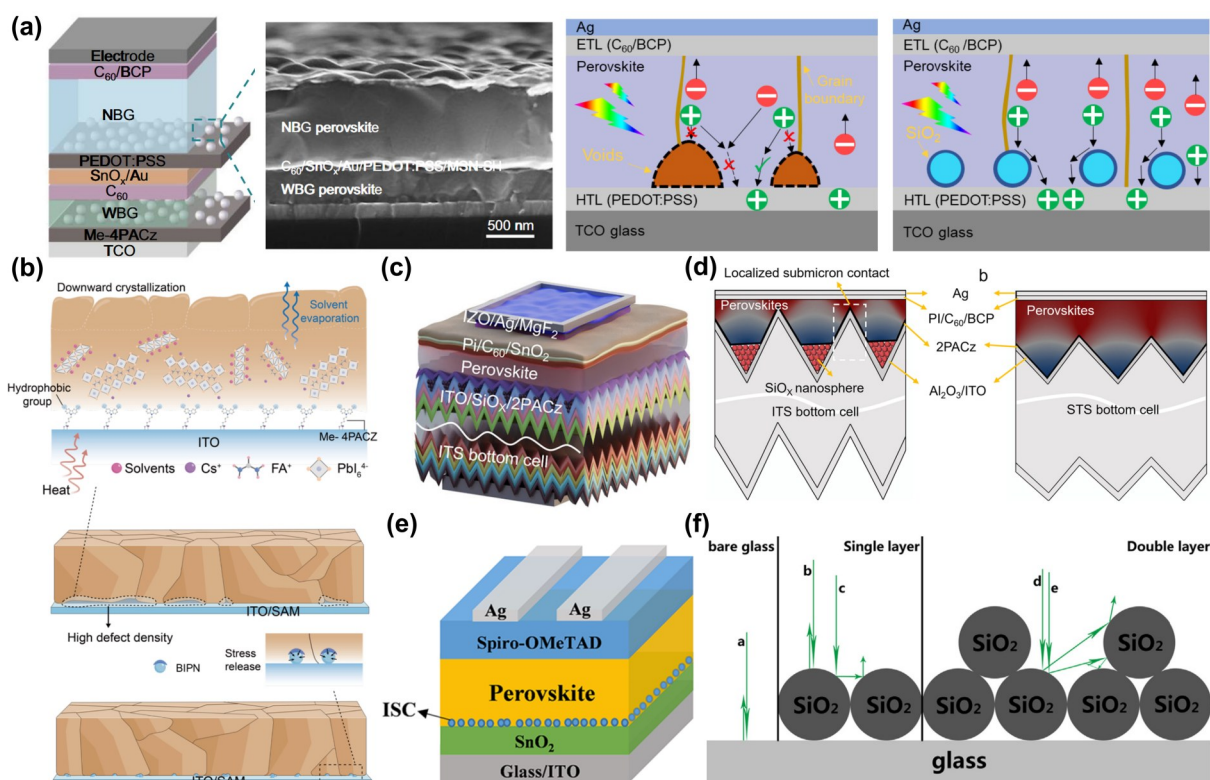


图4 SiO_2 埋底层结构设计与界面调控示意图^[27,29,57,70-71]

Fig.4 Schematic diagram of structural design and interface regulation of SiO_2 buried substrate layers^[27,29,57,70-71]

SiO₂埋底界面层的结构设计与界面调控策略,包括SiO₂纳米颗粒构筑的局域介电接触结构、SiO₂骨架辅助的埋底支撑结构、SiO₂基复合界面层以及用于叠层器件中的界面调控设计。根据不同应用需求, SiO₂可通过颗粒尺寸、空间分布及表面功能化方式调节界面接触状态,实现缺陷钝化、应力释放、光学调控和载流子输运优化等作用。图中WBG (wide-bandgap) 表示宽带隙钙钛矿, NBG (narrow-bandgap) 表示窄带隙钙钛矿, HTL (hole transport layer) 和 ETL (electron transport layer) 分别表示空穴传输层和电子传输层, ISC (island-like silica coating) 表示岛状二氧化硅涂层结构。

4.1 局域介电接触与光学调控

SiO₂在埋底界面中的一类重要作用,是通过颗粒阵列或岛状分布形成局域介电接触,在部分区域以绝缘介电相降低钙钛矿与底部传输层之间的直接复合接触,同时在未覆盖区域保留有效载流子提取通道。从作用原理来看,该结构通过调节绝缘区域与导电区域的空间分布,降低钙钛矿与底部传输层之间的直接接触,从而减少界面复合损失,同时保证载流子的有效提取。其设计关键在于控制绝缘区域的特征间距小于钙钛矿薄膜中载流子的扩散长度,使载流子能够通过横向迁移到相邻导电区域完成传输,避免绝缘区域对电荷收集过程产生明显影响。与连续致密绝缘层容易阻碍载流子传输不同,这类离散SiO₂结构可减少钙钛矿与底部传输层的直接接触,降低界面非辐射复合,同时保持连续的电荷传输路径,从而在复合抑制与载流子传输之间取得平衡。

该局域介电接触设计同样适用于其他氧化物体系。Li等在反式器件埋底界面引入Al₂O₃纳米颗粒,将其作为介电调控层和成膜辅助结构。Al₂O₃颗粒能够填充界面空隙、改善埋底界面形貌,并减少界面缺陷引起的复合损失;同时,颗粒之间保留的间隙为载流子传输提供连续通道。实验结果表明,该改性使器件开路电压由1.02 V提升至1.14 V,进一步说明氧化物局域介电结构在不同界面体系中的应用潜力及性能改善作用^[72]。

除电学调控外, SiO₂还具有低折射率和良好透光性,可通过抗反射、散射增强和局部光场调节提高器件的光利用效率。早期研究表明,外表面SiO₂纳米球抗反射层能够降低宽波段反射损失并

提升短路电流,说明SiO₂纳米结构在折射率调节和光散射方面具有应用基础^[71]。在此基础上,若将SiO₂引入器件内部界面,则其局域介电接触与光学调控可以进一步耦合发挥作用。

类似的局域介电接触和光学调控思路也可在钙钛矿/电子传输层埋底界面中得到体现。Zhang等近期在SnO₂表面构筑岛状SiO₂涂层,较系统地展示了这一思路。该结构利用离散SiO₂岛状分布形成梯度折射率剖面,有效提高电子传输层的宽波段透光率,同时通过局域绝缘相实现抗反射与界面钝化的协同作用。相关表征结果显示,岛状SiO₂将SnO₂层的平均透过率从85.8%提升至88.87%,同时可降低界面氧空位缺陷浓度,使SnO₂表面氧空位占比从24.67%降至18.86%,还能改善钙钛矿成膜均匀性并促进晶粒生长。最终器件短路电流由24.61 mA·cm⁻²提升至25.85 mA·cm⁻²,效率由22.49%提升至24.43%^[70]。这说明SiO₂在埋底界面中的作用并不局限于单一光学增益,而是在局域介电接触基础上实现了光管理、缺陷钝化与载流子提取过程的协同优化。

4.2 埋底支撑、应力缓释与界面强化

SiO₂在埋底界面中不仅可发挥局域介电接触作用,还可通过纳米颗粒或介孔骨架提供局部结构支撑,缓解结晶和退火过程中产生的界面应力,并增强底部接触的机械稳定性。相较于连续平面接触,离散分布的SiO₂结构可缓释薄膜收缩引发的应力集中,减少底部空隙生成,改善埋底界面的结合状态。

针对埋底界面的空隙与应力瓶颈, SiO₂常与有机钝化组分协同实现力学支撑与缺陷钝化的双重增益。Wen等针对可规模化刮涂器件中SAM/钙钛矿界面的微米尺度间隙问题,引入SiO₂纳米球与4F-PEACl组成的埋底复合结构。SiO₂纳米球作为机械增强单元缓解界面应力、缩减埋底间隙,配合4F-PEACl的界面钝化作用,同步提升了界面结合力与载流子输运性能^[29]。

在此基础上,介孔SiO₂骨架可提供更充分的结构支撑与界面调控能力。Wang等将巯基功能化介孔SiO₂引入叠层器件锡铅钙钛矿的埋底界面,提出兼具支撑与钝化作用的超结构骨架,可有效抑制底部空隙形成,释放残余应力,改善埋底区域结晶质量与界面附着力,降低缺陷诱导的载流

子损失^[27]。该结构调控思路还可拓展至复杂纹理基底,Zhang等在工业纹理硅表面引入 SiO_x 纳米球,通过填充金字塔谷底优化界面形貌,提升SAM层覆盖均匀性与钙钛矿沉积质量,降低深纹理表面的接触损失,改善谷底区域埋底界面的结合稳定性^[57]。由此可见, SiO_2 在埋底界面中的作用已由传统介电颗粒进一步拓展到复杂基底适配条件下的支撑、应力调节和界面强化。

4.3 表面功能化及复合功能层设计

除局域介电接触和结构支撑外, SiO_2 表面丰富的羟基位点也赋予其较强的表面修饰能力,使其能够作为分子锚定载体和复合界面构筑单元。通过与分子选择层或功能化组分协同设计, SiO_2 不仅能够改善埋底界面的结合稳定性,还可进一步调节界面缺陷状态、分子排列方式以及载流子选择性传输特征,实现多功能界面调控。

Luo等提出了基于 SiO_x 纳米颗粒的体相纳米异质界面策略,用于改善分子选择层与导电基底之间的接触状态。研究表明, SiO_x 纳米颗粒可增加分子层与基底之间的有效接触面积,增强分子锚定作用,并改善分子堆积方式,使传统平面接触转变为更稳定的纳米异质界面,从而提升器件运行稳定性^[30]。类似地,Xie等将胶体 SiO_2 纳米颗粒与4PADCB分子结合,构建无机-有机杂化空穴传

输界面。 SiO_2 表面的羟基位点可为4PADCB分子提供锚定位点,减少分子聚集并提高界面覆盖均匀性;同时,纳米颗粒在界面中起到结构支撑作用,有助于缓解钙钛矿生长过程中的局部应力,改善薄膜结晶质量和界面结合稳定性。该杂化界面有效提升了器件的光伏性能和长期运行稳定性^[73]。

此外,巯基功能化介孔 SiO_2 骨架以及与钝化分子协同修饰的 SiO_2 纳米结构也表明, SiO_2 表面功能化能够进一步拓展其在埋底界面中的应用范围^[27,29]。总体来看, SiO_2 在埋底界面中的作用已由单一的局域介电调控逐渐拓展至分子锚定、结构增强和复合功能层构筑。相比 Al_2O_3 , SiO_2 在颗粒结构调节、表面化学修饰以及工艺兼容性方面具有更高灵活性,因此在埋底填充、界面强化和多功能复合设计中展现出较大的应用潜力。

4.4 不同氧化物埋底调控策略的器件性能对比

为系统量化不同氧化物埋底界面层的性能优化效果,本节对近年来具有代表性的氧化物埋底界面调控策略及器件性能进行汇总对比。表1整理了代表性工作的器件构型、钙钛矿带隙以及冠军光伏性能参数(J_{sc} 、 V_{oc} 、FF和PCE),直观呈现不同氧化物界面设计策略对器件性能提升的影响及其性能水平。

表1 不同氧化物埋底界面层调控策略下反式钙钛矿太阳能电池性能对比

Tab. 1 Photovoltaic performance comparison of inverted perovskite solar cells with different oxide-based buried interfacial layers

参考文献	器件结构	钙钛矿 带隙/eV	器件 类型	$J_{sc}/$ $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	V_{oc}/V	FF/%	PCE/%
[18]	ITO/ NiO_x /Me-4PACz/PC/FAPbI ₃ /C ₆₀ /BCP/Ag	1.55	p-i-n	25.88	1.175	82.54	25.09
[21]	ITO/Me-4PACz/ Al_2O_3 NPs/FACsPbI ₃ Br ₃ /DAI+PDAl ₂ /LiF/C ₆₀ /BCP/Ag	1.70	p-i-n	20.92	1.223	83.00	21.23
[24]	ITO/Me-4PACz/ Al_2O_3 PIC/perovskite/C ₆₀ /BCP/Ag	1.55	p-i-n	25.08	1.208	84.37	25.56 (认证24.90)
[25]	ITO/SAM/2-ATCl- Al_2O_3 /perovskite/C ₆₀ /BCP/Ag	1.55	p-i-n	26.38	1.189	84.88	26.63 (认证26.42)
[26]	ITO/Me-4PACz/e- Al_2O_3 /perovskite/PDADI/C ₆₀ /ALD-SnO ₂ /Ag	1.53	p-i-n	26.47	1.200	85.19	27.30 (认证27.00)
[27]	ITO/Me-4PACz/MSN-SH/WBG perovskite/C ₆₀ /SnO ₂ /Au/ PEDOT:PSS/MSN-SH/NBG perovskite/C ₆₀ /BCP/Ag	WBG $\approx$ 1.80 NBG $\approx$ 1.25	Tandem	16.30	2.180	83.40	29.60 (认证29.50)
[29]	ITO/SAM/ SiO_2 +4F-PEACl/perovskite/C ₆₀ /ALD-SnO ₂ /Cu	1.50	p-i-n	26.16	1.177	84.40	26.00 (认证25.69)
[30]	ITO/ SiO_x -MeO-2PACz/perovskite/C ₆₀ /BCP/Ag	1.53	p-i-n	26.20	1.180	85.60	26.50 (认证26.30)
[70]	ITO/SnO ₂ /ISC/FAPbI ₃ /Spiro-OMeTAD/Ag	1.52	n-i-p	25.85	1.155	81.8	24.43
[73]	ITO/ SiO_2 -4PADCB/FAPbI ₃ /C ₆₀ /BCP/Ag	1.53	p-i-n	26.57	1.187	86.77	27.35 (认证26.92)

5 结 论

综上,氧化物埋底界面层已成为反式钙钛矿太阳能电池界面工程的重要研究方向。通过局域绝缘接触、固定电荷调控、结构支撑与表面功能化等多重作用路径,氧化物材料在改善埋底成膜质量、抑制界面复合、提升器件稳定性方面展现出显著优势。其中, Al_2O_3 更侧重多孔绝缘接触构建、纳米尺度成膜调控与原子级界面钝化,在复合抑制与精细界面调节方面表现突出; SiO_2 则依托工艺成熟、成本较低、结构可设计性强与表面易修饰的优势,在局域介电接触、应力缓释、埋底缺陷填充及复合功能层设计方面具备更高的应用灵活性。

当前氧化物基埋底界面层研究仍面临若干共性挑战。一方面,氧化物层厚度、介电特性及空间分布对界面钝化效果和载流子传输行为的影响规律尚未完全明确,不同结构形式的氧化物界面层在抑制复合与保证电荷输运之间的作用边界仍缺乏系统认识。例如,多孔绝缘接触、固定电荷调控和表面功能化等策略均可有效降低界面复合损失,但其实际作用效果往往受到氧化物形貌、界面化学状态以及钙钛矿材料体系等多种因素共同影响,相关调控规律仍有待

进一步厘清。另一方面,化学官能团钝化、缺陷填充、应力调节以及光学调控等作用通常同时发生,不同因素对器件性能提升的具体贡献仍难以准确区分,目前主要依赖多种表征手段进行综合分析,缺少能够对界面调控效果进行统一评价的方法。

近年来,随着反式钙钛矿太阳能电池向高效率、柔性化及规模化应用方向发展,氧化物基埋底界面层的应用也逐渐由实验室小面积器件拓展至柔性器件和大面积组件,在改善界面接触质量、调节薄膜生长过程以及提升器件运行稳定性方面展现出良好的应用前景^[74-75]。然而,面向实际应用需求,氧化物埋底界面层仍需进一步解决大面积制备过程中膜层覆盖均匀性、复杂基底适应性、机械可靠性以及长期运行环境下稳定性等问题。未来研究不仅需要进一步深化对氧化物界面作用行为的认识,明确介电调控、缺陷钝化、应力缓释及载流子传输等因素对器件性能的影响规律,同时也应加强其在柔性器件、大面积组件和实际工作条件下的应用验证,推动氧化物埋底界面层从实验室性能优化向面向应用的界面设计发展,为高效率、高稳定性反式钙钛矿太阳能电池的进一步发展提供可靠的界面调控方案。

参 考 文 献:

- [1] ZHENG Z, YANG X, WANG J, *et al.* Maximizing carrier extraction in hybrid back-contact silicon solar cells[J]. *Nature*, 2026, 652(8110): 650-654.
- [2] TONG H, TAN S, ZHANG Y, *et al.* Total-area world-record efficiency of 27.03% for 350.0 cm² commercial-sized single-junction silicon solar cells[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 5920.
- [3] ZHANG L, LI Y, CAI H, *et al.* Advances in anchoring-based self-assembly hole-transporting materials for perovskite solar cells[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2026, 71(1): 78-92.
- [4] 单才伟, 黄坤, 赵建文, 等. CsPbI₂Br 钙钛矿光伏研究进展[J]. 材料导报, 2026: 1-21.
DAN C W, HUANG K, ZHAO J W, *et al.* Research progress of CsPbI₂Br perovskite photovoltaics[J]. *Mater. Rep.*, 2026: 1-21. (in Chinese)
- [5] 黄天宇, 吴疆, 赵丽宸, 等. 蓬勃发展的钙钛矿太阳能电池[J]. 物理, 2025, 54(8): 1-12.
HUANG T Y, WU J, ZHAO L C, *et al.* The booming development of perovskite solar cells[J]. *Phys.*, 2025, 54(8): 1-12. (in Chinese)
- [6] 王爱丽, 张浩然, 杜开怀, 等. 机器学习在钙钛矿太阳能电池的应用研究进展[J]. 科学通报, 2026: 1-12.
WANG A L, ZHANG H R, DU K H, *et al.* Research progress of machine learning applications in perovskite solar cells[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2026: 1-12. (in Chinese)
- [7] LUO J, ZHAO H, YIN H, *et al.* Spiro-buckybowl-structured hole-transporting materials toward high-efficiency and stable p-i-n perovskite solar cells[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(22): e25625.
- [8] CHEN X, XU P, WANG Q, *et al.* Photo-tautomerization-driven energy transfer at the hole-transport interface sta-

- bilizes efficient inverted perovskite solar cells [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(23): e3596437.
- [9] YANG G, CHEN L, DUAN L, *et al.* Molecular confinement for enhanced interfacial contact and performance in inverted perovskite solar cells[J]. *Nature Communications*, 2026, 17(1): 5417.
- [10] MA Y, ZHAO X, CHEN H, *et al.* Progress and perspective of perovskite thin single crystal photodetectors[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2025, 41(4): 100030.
- [11] LIU S, MIAO T, ZHANG Y, *et al.* Progress in high-efficiency inverted perovskite solar cells: Charge transport, interface engineering, and stability[J]. *ACS Energy Letters*, 2026, 11(4): 3121-3147.
- [12] TANG F, YIN S, LUO X, *et al.* π -Conjugation and Hole - Electron Separation in Self-Assembled Monolayers Enables Efficient Inverted Perovskite Solar Cells[J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, 16(24): e70942.
- [13] QI X, WANG J, YEDDU V, *et al.* Disaggregation of self-assembling molecules for efficient inverted perovskite solar cells [J]. *ACS Nano*, 2026, 20(13): 10394-10403.
- [14] LI Z, WANG K, LI R, *et al.* Interfacial energetics reconstruction via bridging engineering for efficient inverted perovskite solar cells and modules[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(22): e9286497.
- [15] CHEN P, XIAO Y, LI S, *et al.* The Promise and Challenges of Inverted Perovskite Solar Cells[J]. *Chemical Reviews*, 2024124(19): 10623-10700.
- [16] LI L, SHI J, XIANG H, *et al.* Self-assembled monolayers in inverted perovskite solar cells: A rising star with challenges [J]. *Nano-Micro Letters*, 2026, 18(1): 241-285.
- [17] MORALES C A F, PIZZO Z, SWEENEY D M, *et al.* Multilayer formation, interfacial binding, and stability of self-assembled molecules in perovskite solar cells [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(52): 48136-48146.
- [18] CAO Q, WANG T, PU X, *et al.* Co-self-assembled monolayers modified NiO_x for stable inverted perovskite solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(16): 2311970.
- [19] PERERA W H K, WOODGATE T J, KIM D K, *et al.* Improved stability and electronic homogeneity in perovskite solar cells *via* a nanoengineered buried oxide interlayer[J]. *EES Solar*, 2025, 1(2): 115-128.
- [20] TANG F, MA N, LU F, *et al.* Boosting efficiency of p-i-n perovskite solar cells via enhanced interfacial dipole strength using Al_2O_3 nanoparticles[J]. *Renewable Energy*, 2025, 250: 123410.
- [21] KIM S E, CHOI S G, LEE S R, *et al.* Localized heterogeneous nucleation for vapor-assisted sequential deposition of metal halide perovskites[J]. *Advanced Energy Materials*, 2026: e06804.
- [22] ZHANG J, LI Y, HUO L, *et al.* Area-selective atomic layer deposition of AlO_x at the buried interface for high-performance perovskite solar cells[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(11): e16537.
- [23] YANG Y, CHENG S, ZHU X, *et al.* Inverted perovskite solar cells with over 2,000 h operational stability at 85°C using fixed charge passivation[J]. *Nature Energy*, 2023, 9(1): 37-46.
- [24] PENG W, MAO K, CAI F, *et al.* Reducing nonradiative recombination in perovskite solar cells with a porous insulator contact[J]. *Science*, 2023, 379(6633): 683-690.
- [25] LI Q, WANG M, LI L. Molecularly guided buried-interface regulation for efficient and stable inverted perovskite solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(23): 10228-10237.
- [26] MAO K, CAI F, DECRESCENT R, *et al.* Passivated porous light-management structure resolves emission-photovoltaic trade-off in thick perovskite diodes[J]. *Joule*, 2026: 102389.
- [27] WANG J, HU S, ZHU H, *et al.* Mercapto-functionalized scaffold improves perovskite buried interfaces for tandem photovoltaics[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 4917.
- [28] YOU W, LAI L, LI J, *et al.* Encapsulation of fluorescent carbon dots into mesoporous SiO_2 colloidal spheres by surface functionalization-assisted cooperative assembly for high-contrast latent fingerprint development[J]. *Chemosphere*, 2025, 370: 143966.
- [29] WEN J, LIU Y, WANG Y, *et al.* Buried heterointerface reinforcement with passivation-integrated nanostructures for efficient and stable perovskite solar modules[J]. *Joule*, 2025, 9(12): 102212.
- [30] LUO Y, SHEN J, ZHAO K, *et al.* Bulk nano-heterointerface secures molecular contacts in perovskite solar cells[J]. *Nature Materials*, 2026: 1-165.

- [31] YANG Y, CHENG S, YANG X, *et al.* Hafnium oxide interface stabilization for efficient, photothermally stable perovskite solar cells[J]. *Science*, 2026, 391(6788): 926-930.
- [32] WANG H, LI H, CAO S, *et al.* Interface modulator of ultrathin magnesium oxide for low-temperature-processed inorganic CsPbIBr₂ perovskite solar cells with efficiency over 11%[J]. *Solar RRL*, 2020, 4(9): 2000226.
- [33] XU R, SUN Y, DAI J, *et al.* Buried interface regulation for efficient and stable perovskite minimodules[J]. *Nano Energy*, 2025, 133: 110406.
- [34] LEE S, WOO M Y, KIM C, *et al.* Buried interface modulation via PEDOT: PSS ionic exchange for the Sn-Pb mixed perovskite based solar cells[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023; 147587.
- [35] CHU Z, ZHANG W, JIANG J, *et al.* Blue light-emitting diodes based on quasi-two-dimensional perovskite with efficient charge injection and optimized phase distribution via an alkali metal salt [J]. *Nature Electronics*, 2023, 6(5): 360-369.
- [36] TORRES MERINO L V, PETOUKHOFF C E, MATIASH O, *et al.* Impact of the valence band energy alignment at the hole-collecting interface on the photostability of wide band-gap perovskite solar cells [J]. *Joule*, 2024, 8(9): 2585-2606.
- [37] BI H, FUJIWARA Y, KAPIL G, *et al.* Perovskite Solar Cells Consisting of PTAA Modified with Monomolecular Layer and Application to All-Perovskite Tandem Solar Cells with Efficiency over 25%[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(32): 2300089.
- [38] YU S, XIONG Z, ZHOU H, *et al.* Homogenized NiO_x nanoparticles for improved hole transport in inverted perovskite solar cells[J]. *Science*, 2023, 382(6677): 1399-1404.
- [39] YANG Y, CHEN R, WU J, *et al.* Bilateral Chemical Linking at NiO_x Buried Interface Enables Efficient and Stable Inverted Perovskite Solar Cells and Modules [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(36): e202409689.
- [40] LI B, ZHANG C, GAO D, *et al.* Suppressing Oxidation at Perovskite-NiO_x Interface for Efficient and Stable Tin Perovskite Solar Cells[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(17): 2309768.
- [41] ZHOU Y, HUANG X, ZHANG J, *et al.* Interfacial Modification of NiO_x for Highly Efficient and Stable Inverted Perovskite Solar Cells[J]. *Advanced Energy Materials*, 2024, 14(25): 2400616.
- [42] JIANG X, ZENG J, SUN K, *et al.* Degradation Mechanisms Associated with Electron-Blocking Layers in Inverted Perovskite Solar Cells[J]. *Advanced Science*, 2026, 13(36): e75170.
- [43] ZHAN L, CHEN X, LIU J, *et al.* Hydrogen bonding enhanced molecular assembly of hole-selective contact for thermally stable perovskite solar cells[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(15): 16278-16289.
- [44] MAO P, BI W, LV J, *et al.* Decoding buried interfaces in perovskite solar cells: Core issues, strategic engineering, and prospects for high-efficiency stable devices[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(40): e12523.
- [45] XU R, WANG C, ZHANG Z, *et al.* Buried interface engineering: a key to unlocking the potential of self-assembled monolayer (SAM)-based inverted perovskite solar cells[J]. *Small*, 2025, 21(32): 2503114.
- [46] JIANG Q, ZHU K. Rapid advances enabling high-performance inverted perovskite solar cells[J]. *Nature Reviews Materials*, 2024, 9(6): 399-419.
- [47] LI B, LI S, GONG J, *et al.* Fundamental understanding of stability for halide perovskite photovoltaics: The importance of interfaces[J]. *Chem*, 2024, 10(1): 35-47.
- [48] YU X, SUN X, ZHU Z, *et al.* Stabilization strategies of buried interface for efficient SAM-based inverted perovskite solar cells[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(4): e202419608.
- [49] ZHOU X, LAI H, HUANG T, *et al.* Suppressing Nonradiative Losses in Wide-Band-Gap Perovskites Affords Efficient and Printable All-Perovskite Tandem Solar Cells with a Metal-Free Charge Recombination Layer[J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8(1): 502-512.
- [50] LI N, SHI Z, FEI C, *et al.* Barrier reinforcement for enhanced perovskite solar cell stability under reverse bias[J]. *Nature Energy*, 2024, 9(10): 1264-1274.
- [51] KIM H S, PARK N G. Future Research Directions in Perovskite Solar Cells: Exquisite Photon Management and Thermodynamic Phase Stability[J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(43): 2204807.
- [52] LEE M M, TEUSCHER J, MIYASAKA T, *et al.* Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal

- halide perovskites[J]. *Science*, 2012, 338(6107): 643-647.
- [53] BALL J M, LEE M M, HEY A, *et al.* Low-temperature processed meso-superstructured to thin-film perovskite solar cells [J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(6): 1739.
- [54] CHEN W, WU Y, LIU J, *et al.* Hybrid interfacial layer leads to solid performance improvement of inverted perovskite solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(2): 629-640.
- [55] CAO X, HE Z, SUN H, *et al.* High-nuclear metal - oxide cluster porous interlayers enabling tailored carrier transport and ion-exchange lead leakage prevention in perovskite solar cells[J]. *Small*, 2025, 21(52): e11905.
- [56] YANG Q, ZHANG H, JIANG Z, *et al.* Mobile oxygen capture enhances photothermal stability of perovskite solar cells under ISOS protocols[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(16): 2500268.
- [57] ZHANG D, WU T, LI B, *et al.* Iceberg-like pyramids in industrially textured silicon enabled 33% efficient perovskite-silicon tandem solar cells[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 7331.
- [58] CHEN S, XIAO X, CHEN B, *et al.* Crystallization in one-step solution deposition of perovskite films: Upward or downward?[J]. *Science Advances*, 2021, 7(4): eabb2412.
- [59] ZENG L R, DING B, ZHANG G, *et al.* Elimination of buried interfacial voids for efficient perovskite solar cells[J]. *Nano Energy*, 2024, 122: 109283.
- [60] LIU J, CHEN X, CHEN K, *et al.* Electron injection and defect passivation for high-efficiency mesoporous perovskite solar cells[J]. *Science*, 2024, 383(6688): 1198-1204.
- [61] SUN A, TIAN C, ZHUANG R, *et al.* High open-circuit voltage (1.197 V) in large-area (1 cm²) inverted perovskite solar cell via interface planarization and highly polar self-assembled monolayer[J]. *Adv. Energy Mater.*, 2024: 1-12.
- [62] PERERA W H K, MASTEGHIN M G, SHIM H, *et al.* Modification of hydrophobic self-assembled monolayers with nanoparticles for improved wettability and enhanced carrier lifetimes over large areas in perovskite solar cells[J]. *Solar RRL*, 2023, 7(17): 2300388.
- [63] CASSELLA E J, OLIVER R D J, THORNBUR T, *et al.* Alumina nanoparticles enable optimal spray-coated perovskite thin film growth on self-assembled monolayers for efficient and reproducible photovoltaics[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(34): 13332-13342.
- [64] PAN L, YU R, FANG Z, *et al.* Buried interface engineering for efficient and stable inverted perovskite solar cells[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 525: 170528.
- [65] LIU N, ZHANG G, WEI M, *et al.* Particle decoration enables solution-processed perovskite integration with fully-textured silicon for efficient tandem solar cells[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 9435.
- [66] XIAO Y, LIANG Z, JIANG B, *et al.* Enhanced perovskite solar cell performance via low-temperature ALD-Al₂O₃ interface modification[J]. *Rare Metals*, 2025, 44(5): 3061-3068.
- [67] ARTUK K, TURKAY D, MENSI M D, *et al.* A universal perovskite/C₆₀ interface modification via atomic layer deposited aluminum oxide for perovskite solar cells and perovskite-silicon tandems [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(21): 2311745.
- [68] FANG L, REN M, LI B, *et al.* Interfacial design strategies for stable and high-performance perovskite/silicon tandem solar cells on industrial silicon cells[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 8881.
- [69] KEDIA M, DAS C, KOT M, *et al.* Mitigating the amorphization of perovskite layers by using atomic layer deposition of alumina[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(11): 5251-5263.
- [70] ZHANG H, LI B, XIONG H, *et al.* Island-like silica coating for optical antireflection and interface passivation in perovskite solar cells with high short-circuit current density[J]. *Applied Materials Today*, 2026, 48: 103046.
- [71] LUO Q, DENG X, ZHANG C, *et al.* Enhancing photovoltaic performance of perovskite solar cells with silica nanosphere antireflection coatings[J]. *Solar Energy*, 2018, 169: 128-135.
- [72] LI H, XIE G, WANG X, *et al.* Buried interface dielectric layer engineering for highly efficient and stable inverted perovskite solar cells and modules[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(19): 2300586.
- [73] XIE Y, ZHENG Z, LIU H, *et al.* Stabilizing the buried interface via inorganic-organic hybrid layers for high-performance perovskite photovoltaics[J]. *Energy & Environmental Science*, 2026
- [74] ZHOU Q, HUANG G, WANG J, *et al.* Aromatic interaction-driven out-of-plane orientation for inverted perovskite solar cells with improved efficiency[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(11): 1371-1381.

- [75] HE M, MA Y, WU S, *et al.* Amorphous grain boundary engineering for scalable flexible perovskite photovoltaics with improved stability[J]. *Nature Energy*, 2026, 11(2): 262-273.



郑焜元(2000—),男,广东茂名,硕士研究生,2019年于广东石油化工学院获得学士学位,现就读于三峡大学化学专业硕士研究生,主要从事钙钛矿太阳能电池器件制备与性能优化研究。

E-mail: 2421538285@qq.com



周倩(1996—),女,四川绵阳人,博士,讲师,2025年于重庆大学获得博士学位,现就职于三峡大学材料与化工学院新能源材料与器件系专任教师,从事新型薄膜太阳能电池研究且取得了一系列研究成果。

E-mail: zhouqian@ctgu.edu.cn



谭新玉(1971—),女,湖北建始人,博士,二级教授,博士生导师,现任荆楚理工学院副校长。2002年和2008年先后于华中科技大学获得硕士和博士学位,2009-2011年在清华大学从事博士后研究,主要从事太阳能电池、节能降温技术及功能材料制备研究。

E-mail: tanxin@ctgu.edu.cn