

## 综述

## 钙钛矿基三结叠层太阳能电池的研究进展\*

许畅<sup>1)2)#</sup> 郑德旭<sup>3)4)#</sup> 董心睿<sup>1)</sup> 吴飒建<sup>3)</sup>武明星<sup>2)</sup> 王开<sup>1)†</sup> 刘生忠<sup>1)4)‡</sup>

1) (中国科学院大学, 中国科学院太阳能光电转换与利用重点实验室, 材料科学与光电子工程中心, 大连化学物理研究所, 大连 116023)

2) (河北师范大学化学与材料科学学院, 河北省无机纳米材料重点实验室, 薄膜太阳能电池材料与器件河北省工程研究中心, 石家庄 050024)

3) (中国核能电力股份有限公司, 北京 100089)

4) (中核光电科技(上海)有限公司, 上海 201306)

(2024 年 8 月 26 日收到; 2024 年 10 月 30 日收到修改稿)

单结太阳能电池的能量转换效率受限于 Shockley-Queisser 理论极限, 而突破该极限的最有效策略是构建多结叠层太阳能电池. 多结叠层太阳能电池通过堆叠多个子电池, 可针对太阳光谱的特定部分进行优化. 钙钛矿材料具有连续可调的能带结构, 为多结叠层电池中的吸光材料组合提供了新的选项. 在钙钛矿基叠层太阳能电池领域, 三结叠层太阳能电池已经取得了一定进展, 在光伏产业中展现出巨大潜力. 本文首先重点介绍了三结叠层太阳能器件结构及面临的科学问题, 然后介绍了钙钛矿基三结叠层电池的研究进展, 包括钙钛矿/钙钛矿/硅叠层电池、钙钛矿/钙钛矿/有机叠层电池和全钙钛矿叠层电池. 最后, 本文分析了进一步提升三结叠层太阳能电池性能的研究方向, 为制备高效三结电池提供了指导.

**关键词:** 叠层, 太阳能电池, 宽带隙钙钛矿, 光致相分离**PACS:** 88.40.jp, 88.40.H-, 88.40.-j, 84.60.Jt**DOI:** 10.7498/aps.73.20241187**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241187

## 1 引言

随着全球能源需求的日益增长和环境问题的日益严峻, 高效、环保的光伏发电技术成为研究热点. 近年来, 钙钛矿材料作为一种新型光电材料<sup>[1]</sup>, 凭借其优异的光吸收性能和载流子传输特性受到光伏领域的广泛关注<sup>[2,3]</sup>. 另外, 钙钛矿材料还具有制备工艺简单、成本低廉等优势, 这些特点使得由钙钛矿材料构筑的光伏器件, 即钙钛矿太阳能电池取得迅速发展. 目前, 钙钛矿太阳能电池认证效率已经

从 3.8% 显著提升至 26.81%<sup>[4]</sup>, 达到了硅太阳能电池的效率水平, 展现出广阔的应用前景, 目前针对钙钛矿电池的产业化研究正如火如荼地进行.

然而, 该效率已经接近钙钛矿单结电池的 Shockley-Queisser (SQ) 理论极限效率, 难以进一步大幅提升. 在光伏发电领域, 提升电池性能是降低太阳能电池平准化度电成本的最有效策略, 因此, 为了进一步提升电池的光电性能, 研究人员开始将目光转移到叠层电池上. 叠层太阳能电池的概念首次被 Meier 等<sup>[5]</sup>在 1994 年提出, 即将不同禁带宽度的吸光材料按从大到小的顺序进行叠合, 宽带隙电池

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFE0138100) 和国家自然科学基金 (批准号: 22279140, U20A20252, 52350710208, U21A20102, 62174103) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: wangkai@dicp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: szliu@dicp.ac.cn

吸收高能光子,窄带隙电池吸收低能光子,充分利用太阳光谱,从而降低高能光子的热化损失,提高太阳能利用率和电池效率<sup>[6]</sup>.图1(a)以三结叠层太阳电池为例展示了叠层电池的光响应原理.理论上,单结电池的SQ极限效率为33.7%<sup>[7]</sup>,而双结和三结叠层电池的极限效率分别为46%和51%<sup>[8,9]</sup>.因此,构建多结叠层电池可以获得更高的能量转换效率(PCE).传统的多结叠层太阳电池通常采用III-V半导体材料制成,然而高昂的材料成本和复杂的沉积技术大大地提高了电池的生产成本<sup>[10]</sup>,限制了其在地面光伏的应用<sup>[11]</sup>.钙钛矿材料的禁带宽度可以在1.2—3.0 eV之间连续调节,这为构建多结叠层太阳电池提供了新的选择<sup>[12]</sup>.可以采用宽带隙的钙钛矿材料与窄带隙的钙钛矿、硅或窄带隙的有机光伏材料结合,形成不同种类的多结叠层电池<sup>[13]</sup>.值得指出的是,鉴于硅电池技术已经趋于成熟<sup>[14]</sup>,能量转换效率难以进一步提升,生产成本也已被压缩到极限,将钙钛矿与硅结合构建叠层电池是进一步提升硅电池性能的重要策略,也是加速钙钛矿光伏技术产业化的重要途径<sup>[15]</sup>.近年来,基于钙钛矿的双结叠层太阳电池的效率不

断提升,全钙钛矿双结叠层电池的认证能量转换效率为29.34%<sup>[4]</sup>,钙钛矿/有机太阳电池的认证能量转换效率为25.06%<sup>[16]</sup>,钙钛矿/硅叠层太阳电池的能量转换效率达到34.6%<sup>[4]</sup>,不仅高于相应单结电池的效率,也已高于III-V基双结叠层太阳电池的效率.以上进展证明了钙钛矿材料在多结叠层电池方面的巨大潜力.

鉴于研究者在钙钛矿基双结叠层电池领域取得的大量进展,且三结叠层电池具有更高的理论效率,因而科研人员开始将目光转移到三结叠层电池领域.在双结叠层电池的基础上,基于钙钛矿的三结叠层太阳电池研究已取得一定进展,为进一步提升钙钛矿基太阳电池的效率提供了可能.考虑到钙钛矿基三结叠层太阳电池在提升电池性能方面的优势,本文将综述这一领域的研究进展,以期对相关领域的研究人员提供有价值的参考和启示.首先,本文介绍了目前报道的不同种类的钙钛矿基三结叠层太阳电池使用的器件结构并指出了电池面临的科技难题.然后,总结了不同种类钙钛矿基三结叠层太阳电池的发展现状.最后,对钙钛矿基三结叠层太阳电池的发展方向进行了展望.

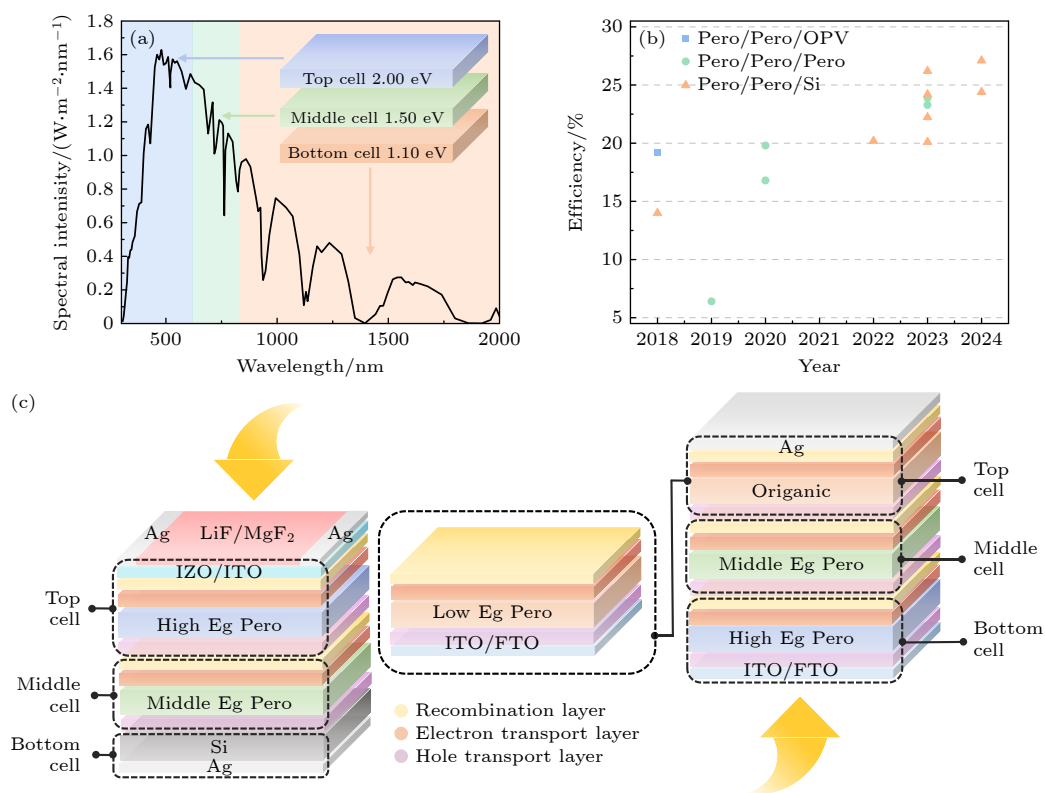


图1 (a) 三结叠层太阳电池光响应原理; (b) 三结钙钛矿基叠层太阳电池效率演变; (c) 三结钙钛矿基叠层太阳电池结构示意图  
Fig. 1. (a) Principle of light response of triple-junction tandem solar cells; (b) PCE evolution of triple-junction tandem solar cells; (c) schematic illustration of the triple-junction perovskite based tandem solar cells.

## 2 三结叠层太阳能电池结构和面临的问题

### 2.1 三结叠层太阳能电池结构

根据底部电池的类型,多结叠层太阳能电池的功能层沉积顺序不同.如图1(c)所示,在全钙钛矿叠层和钙钛矿/钙钛矿/有机叠层太阳能电池中,宽带隙钙钛矿薄膜最先沉积在导电玻璃衬底上,之后沉积中间带隙钙钛矿电池,最后沉积窄带隙的钙钛矿电池或有机电池.而在钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池中,硅电池本身充当衬底,在其表面依次沉积中间带隙钙钛矿层和宽带隙钙钛矿层.在三结叠层电池中,各子电池间通过中间互连层形成电学连接,以最小的电阻损耗有效地抑制了电子和空穴的复合<sup>[17]</sup>,并在保证高光学透明性(低寄生光吸收<sup>[18]</sup>和低光反射<sup>[19]</sup>)的条件下,以降低光学损耗.此外,三结叠层电池要求中间互连层具有较强的溶剂阻隔能力,确保二次制备钙钛矿时前一层钙钛矿薄膜不被溶解<sup>[20]</sup>.在子电池结构上,得益于在双结叠层电池领域取得的结果,研究人员已经确认反式 p-i-n 结构的钙钛矿太阳能电池具有较低的光学损耗<sup>[21]</sup>,更适合构建叠层电池,即依次沉积空穴传输层,钙钛矿层和电子传输层<sup>[22]</sup>.

虽然三结叠层太阳能电池具有极大的理论潜力,但在研究过程中需要考虑实际因素和局限性,明确并解决相关问题,以实现技术的快速发展.

### 2.2 子电池之间的带隙匹配

电流匹配是多结叠层太阳能电池面临的重要问题之一<sup>[23]</sup>.在多结叠层的太阳能电池中,整体输出电流受到产生最低电流的子电池限制<sup>[24]</sup>.因此,为了使太阳能电池的电流输出最大化,每个子电池产生的电流应该相同<sup>[25]</sup>,这可以通过优化子电池吸收层的禁带宽度来实现.本文依据太阳光入射方向,将三结叠层电池中的宽带隙子电池命名为顶电池,中间带隙子电池命名为中间电池,窄带隙子电池命名为底电池. Hörantner 等<sup>[6]</sup>通过光学和电学模拟评估了钙钛矿基三结叠层太阳能电池的带隙组合和实际潜力.在模拟中既考虑了寄生吸收、串联和分流电阻等由实验数据得出的光学和电学损失,也考虑了子电池的非辐射重组等行为,发现带隙的最佳组合受各层光电性质和损耗机制的影响,应根据每种结

构和层间材料的性质来确定.如图2所示,当采用硅电池作为窄带隙(约 1.1 eV)底电池时,宽带隙钙钛矿和中间带隙钙钛矿的理想禁带宽度分别为 1.95 eV 和 1.44 eV,最高效率可达到 38.8%;当采用钙钛矿作为窄带隙(约 1.2 eV)底电池时,对应的宽带隙钙钛矿和中间带隙钙钛矿的理想禁带宽度分别为 2.04 eV 和 1.58 eV<sup>[6]</sup>,最高效率可达 36.6%;目前高效率有机电池的最小禁带宽度约为 1.30 eV<sup>[26]</sup>,对应的宽带隙钙钛矿和中间带隙钙钛矿的理想禁带宽度分别为 2.13 eV 和 1.66 eV.中间层钙钛矿的禁带宽度与现阶段广泛研究的单结钙钛矿太阳能电池的禁带宽度接近,已经取得大量成果.三结电池要求顶部宽带隙子电池的带隙在 1.85—2.15 eV 之间<sup>[27]</sup>,而研究人员对该范围内宽带隙钙钛矿材料研究较少.

### 2.3 光致相分离

目前宽带隙钙钛矿材料体系主要包括准二维钙钛矿、碘溴混合的有机-无机复合钙钛矿和无机钙钛矿<sup>[28-30]</sup>.在全钙钛矿叠层电池和钙钛矿/钙钛矿/有机叠层电池中,采用碘溴混合的有机-无机复合钙钛矿和无机钙钛矿构建顶电池;而钙钛矿/钙钛矿/硅叠层电池中只能采用有机-无机复合的宽带隙钙钛矿构建顶电池.这些宽带隙钙钛矿材料受限于较差的晶体质量<sup>[31,32]</sup>,存在较高的缺陷态密度<sup>[33-35]</sup>,显著影响电池性能,增加电池的能量损失.例如,二维钙钛矿具有高激子结合能和低载流子迁移率<sup>[36,37]</sup>.全无机钙钛矿通常需要 200 °C 以上的退火过程<sup>[38]</sup>,必须优先制备,否则会造成底层和中间钙钛矿太阳能电池的降解<sup>[39]</sup>.最后,有机-无机混合卤化钙钛矿需要高溴碘比以获得宽带隙<sup>[40]</sup>,但该类材料存在光致相分离问题,即光照后形成富 Br 区和富 I 区<sup>[41-43]</sup>,而富 I 区的禁带宽度较窄,会俘获光生电子,加快电荷复合,导致太阳能电池开路电压的损失较大,是宽带隙钙钛矿面临的关键问题之一.

为解决光致相分离问题,文献中报道了几种策略.1) 组分工程:在有机-无机混合卤化钙钛矿中 Br 和 Cs 的含量每增加 10%,带隙分别扩大 0.06 eV 和 0.02 eV 左右,增加 Cs 含量可以在一定程度上降低 Br 含量,同时保持相似的带隙,提高光稳定性<sup>[44,45]</sup>.在钙钛矿的 A 位阳离子中加入其他小尺寸阳离子,如铷 (Rb)<sup>[46,47]</sup>、钾 (K)<sup>[48]</sup> 等,可以增加

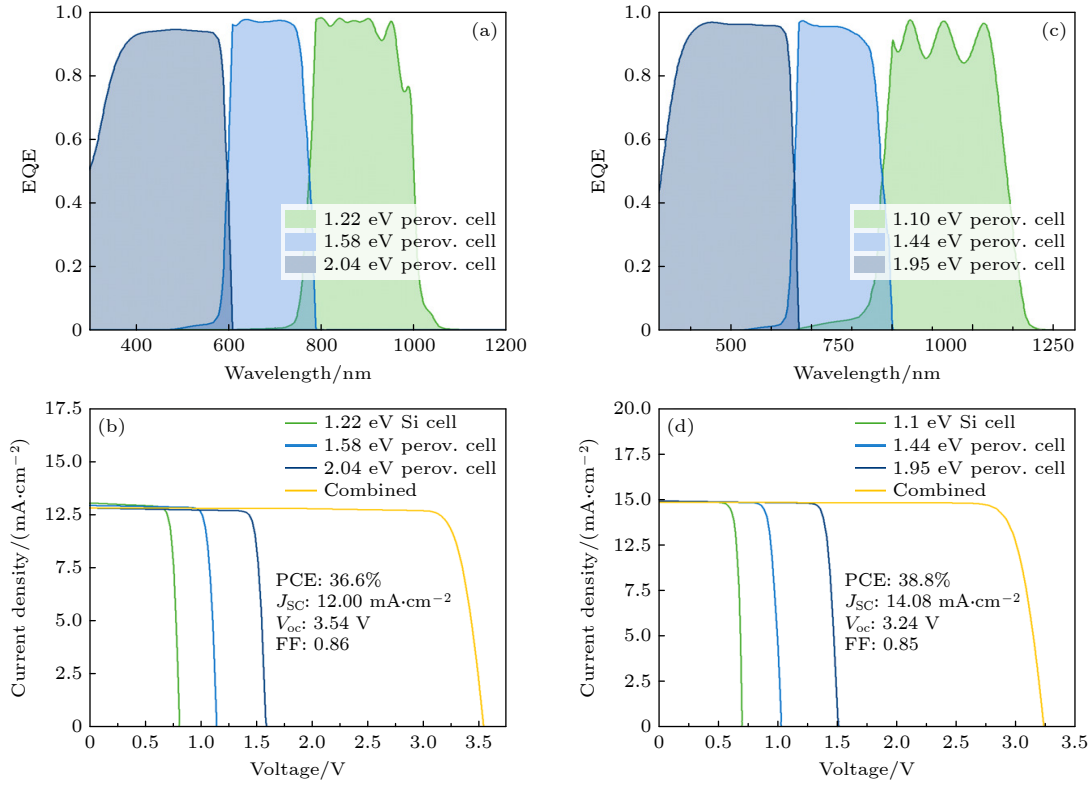


图2 (a) 全钙钛矿叠层太阳能电池的最大实际PCE为36.6%时的EQE曲线<sup>[6]</sup>; (b) 全钙钛矿叠层太阳能电池的最大实际PCE为36.6%时的 $J$ - $V$ 曲线<sup>[6]</sup>; (c) 钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池的最大实际PCE为38.8%时的EQE曲线<sup>[6]</sup>; (d) 钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池的最大实际PCE为38.8%时的 $J$ - $V$ 曲线<sup>[6]</sup>

Fig. 2. (a) EQE curves for an all-perovskite tandem solar cell with a maximum practical PCE of 36.6%<sup>[6]</sup>; (b)  $J$ - $V$  curves for an all-perovskite tandem solar cell with a maximum practical PCE of 36.6%<sup>[6]</sup>; (c) EQE curves for a perovskite/perovskite/silicon solar cell with a maximum practical PCE of 38.8%<sup>[6]</sup>; (d)  $J$ - $V$  curves for a perovskite/perovskite/silicon solar cell with a maximum practical PCE of 38.8%<sup>[6]</sup>.

晶格畸变并阻止离子迁移, 是减缓相分离的另一种策略. 2) 结晶工程: 相分离程度受钙钛矿的晶界、体相或表面存在的缺陷密度影响<sup>[49]</sup>, 通过调整制备方法<sup>[50]</sup>、退火时间和退火温度等<sup>[51,52]</sup>可以改善钙钛矿的结晶度和增大晶粒尺寸以提高钙钛矿的光稳定性. 3) 添加剂工程: Yu等<sup>[53]</sup>采用硫氰酸铅 $\text{Pb}(\text{SCN})_2$ 作为添加剂获得了更大的晶粒尺寸. Kim等<sup>[54]</sup>通过在钙钛矿前驱体中加入 $\text{Pb}(\text{SCN})_2$ 和苯乙基碘化铵(PEAI), 改善了宽带隙钙钛矿的形貌和结晶度. Thiesbrummel等<sup>[55]</sup>在宽带隙钙钛矿中加入了少量油胺, 改善了开路电压. 此外, 氯化甲胺(MACl)和苯乙基乙酸铵(PEAAc)也已成功应用于宽带隙钙钛矿中, 使卤化物分布更加均匀, 并减轻相分离<sup>[56,57]</sup>. 4) 界面工程: 使用诸如PEAI和溴化丁基铵(BABr)等材料进行表面和界面钝化, 可在三维钙钛矿顶部形成二维钙钛矿层, 阻止离子迁移进而减轻相分离<sup>[58,59]</sup>. Belisle等<sup>[60]</sup>和Caprioglio等<sup>[61]</sup>也分别报道了4-氟苯乙基碘化铵(FPEAI)

或盐酸苯乙双胍(PhenHCl)对晶界和表面的双重钝化作用. 用供电子配体三辛基氧化膦(TOPO)对钙钛矿进行表面改性, 也可以抑制相分离<sup>[62]</sup>. 因此, 通过优化钙钛矿组分, 调控晶体质量和钝化表面界面缺陷均可以抑制宽带隙钙钛矿的相分离过程, 提升薄膜光稳定性.

## 2.4 中间互连层

在多结太阳能电池中, 子电池通过中间互连层串联在一起, 中间层造成折射率差异会导致较大的光学干扰, 从而出现不必要的反射. 因此, 减少反射损失以及最小化中间互连层的寄生吸收至关重要<sup>[63-65]</sup>. 此外, 中间互连层除了满足低电阻损耗和高光学透明度等基本要求外, 横向电导率也应尽可能低, 以防止产生横向电流而促进电荷复合. 为满足上述要求, 高质量的中间层通常选用具有高透过率的透明导电氧化物(TCO)薄膜<sup>[66]</sup>, 在首次报道的钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池中, 采用150 nm



氧化铟锡 (IZO) 作为钙钛矿中间电池和顶部电池之间的互连层<sup>[67]</sup>. 然而, 该 TCO 层电阻较低, 导致横向电流较大, 促进了电池内部分流复合. 之后, Nejjand 等<sup>[68]</sup> 采用 15 nm 的氧化铟锡 (ITO) 作为中间层后, 可以将更多的光传输到中间电池并减少分流, 其全钙钛矿双结太阳能电池短路电流密度增加了 0.9 mA/cm<sup>2</sup>. Brinkmann 等<sup>[57]</sup> 使用 1.5 nm 的氧化铟 (InO<sub>x</sub>) 作为复合层制备了钙钛矿/有机双结叠层太阳能电池. 值得注意的是, 较薄的 TCO 层可能无法有效地隔绝上下子电池之间的离子扩散, 进而影响稳定性. 另外, 在 TCO 层溅射之前须沉积一层缓冲层来降低离子轰击对底层薄膜的伤害, 通常是原子层沉积 (ALD) 的氧化锡 (SnO<sub>x</sub>) 层. 此外, Choi 等<sup>[69]</sup> 提出采用聚乙氧基化乙烯亚胺 (PEIE) 涂层作为缓冲层, 成功在其顶部溅射 20 nm 的 ITO 作为中间层, 构建了效率为 22.23% 的钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池. 可以预见, 针对中间互连层的未来研究重点是进一步提升透光率、降低横向电流、提高致密程度等.

## 2.5 工艺兼容

多结叠层太阳能电池的最后一个问题是工艺兼容问题<sup>[70]</sup>. 多结叠层太阳能电池中各功能层采用不同的沉积方法依次堆叠, 增加了制备工艺的复杂性. 因此功能层间制备工艺的兼容性尤为重要, 主要涉及正交溶剂匹配、退火温度兼容、溅射伤害等. 克服溶剂相容性问题, 避免破坏已有子电池的策略包括: 1) 将传统的钙钛矿前驱液溶剂二甲基甲酰胺/二甲基亚砜 (DMF/DMSO) 替换为新型低极性溶剂体系, 如乙腈/甲胺 (ACN/MA)<sup>[69]</sup>; 2) 采用无溶剂方法沉积子电池, 利用真空沉积方法制备具有最佳带隙但成分复杂的钙钛矿; 3) 对中间互连层设计进行优化, 在光学透明度、漏电流、电阻损耗和隔绝能力之间取得良好的平衡<sup>[71,72]</sup>, 使其可以作为一个物理屏障, 保护底层不受后续溶剂的影响<sup>[73]</sup>. 这种子电池之间的工艺兼容对于大面积电池制备尤为重要, 亦有利于提升电池的长期稳定性.

## 3 三结叠层钙钛矿太阳能电池研究现状

多结叠层太阳能电池包含多个光吸收层, 增强了光吸收, 减少了载流子热损耗, 在提升太阳光谱利用率的同时也带来了新的挑战. 例如, 如何实现溶

剂间的正交性, 如何改善中间互连层的光电性能并增加其隔绝能力, 如何抑制宽带隙钙钛矿的分层问题等等. 本节总结了钙钛矿/钙钛矿/有机、钙钛矿/钙钛矿/钙钛矿和钙钛矿/钙钛矿/硅三种钙钛矿基叠层太阳能电池的最新进展, 重点介绍了它们制备过程、优化方法、电池性能和稳定性. 图 1(b) 汇总了现阶段三结叠层电池的能量转换效率.

### 3.1 钙钛矿/钙钛矿/有机叠层太阳能电池

在三结叠层电池中, Isikgor 等<sup>[74]</sup> 率先采用有机吸收材料构建窄带隙子电池, 制备了第一个三结钙钛矿/钙钛矿/有机叠层太阳能电池. 其中, 顶电池采用 2.05 eV 的宽带隙钙钛矿 Cs<sub>0.15</sub>MA<sub>0.15</sub>FA<sub>0.70</sub>Pb(I<sub>0.15</sub>Br<sub>0.85</sub>)<sub>3</sub> (其中, MA 是甲胺阳离子, FA 是甲脒阳离子), 中间电池采用禁带宽度为 1.62 eV 的 Cs<sub>0.15</sub>MA<sub>0.15</sub>FA<sub>0.70</sub>Pb(I<sub>0.85</sub>Br<sub>0.15</sub>)<sub>3</sub> 钙钛矿层, 二者之间通过由 C<sub>60</sub>(20 nm)/BCP(8 nm)/IZO(2 nm)/NiO<sub>x</sub>(15 nm) 组成的中间互连层连接 (图 3(a)), 其中 BCP 是浴铜灵 (二环 [1.1.1] 戊烷). 最后使用三元有机体异质结 (bulk-heterojunction, BHJ) PM6:BTP-eC9:PC<sub>71</sub>BM (约 100 nm) 为活性层构筑顶电池, 其中 PM6 是聚醚型聚合物供体, BTP-eC9 是非富勒烯受体, PC<sub>71</sub>BM 是 [6,6]-苯基 C<sub>71</sub> 丁酸甲酯. 中间电池和顶电池之间的互连层采用 C<sub>60</sub>(20 nm)/BCP(8 nm)/IZO(2 nm)/MoO<sub>3</sub>(10 nm), 最后沉积 10 nm 的 PDINO((N, N-二甲基铵 N-氧化物) 丙基茈二亚胺) 电子提取层和 100 nm 厚的银电极. 但由于宽带隙钙钛矿与 C<sub>60</sub> 电子传输层之间存在能级失配问题, 底电池表现出高达 0.78 V 的开路电压损失, 同时中间电池和有机电池的开路电压损失分别为 0.44 V 和 0.48 V. 最终活性面积为 0.1 cm<sup>2</sup> 的三结叠层电池开路电压为 3.03 V, 能量转换效率为 19.4%, 短路电流密度为 9.1 mA/cm<sup>2</sup>, 填充因子为 70.4%. 该研究证明采用钙钛矿层与有机 BHJ 层结合构建三结叠层太阳能电池的可行性, 表明该体系的电池性能仍有较大提升空间.

### 3.2 钙钛矿/钙钛矿/钙钛矿叠层太阳能电池

全钙钛矿三结叠层太阳能电池的研究最早始于 2019 年, 英国牛津大学的 Snaith 团队<sup>[75]</sup> 提出了第一个全钙钛矿三结叠层太阳能电池. 他们采用乙腈/甲胺混合溶剂配置钙钛矿前驱体溶液以实现自下而上地沉积钙钛矿层. 电池所采用的钙钛矿组分

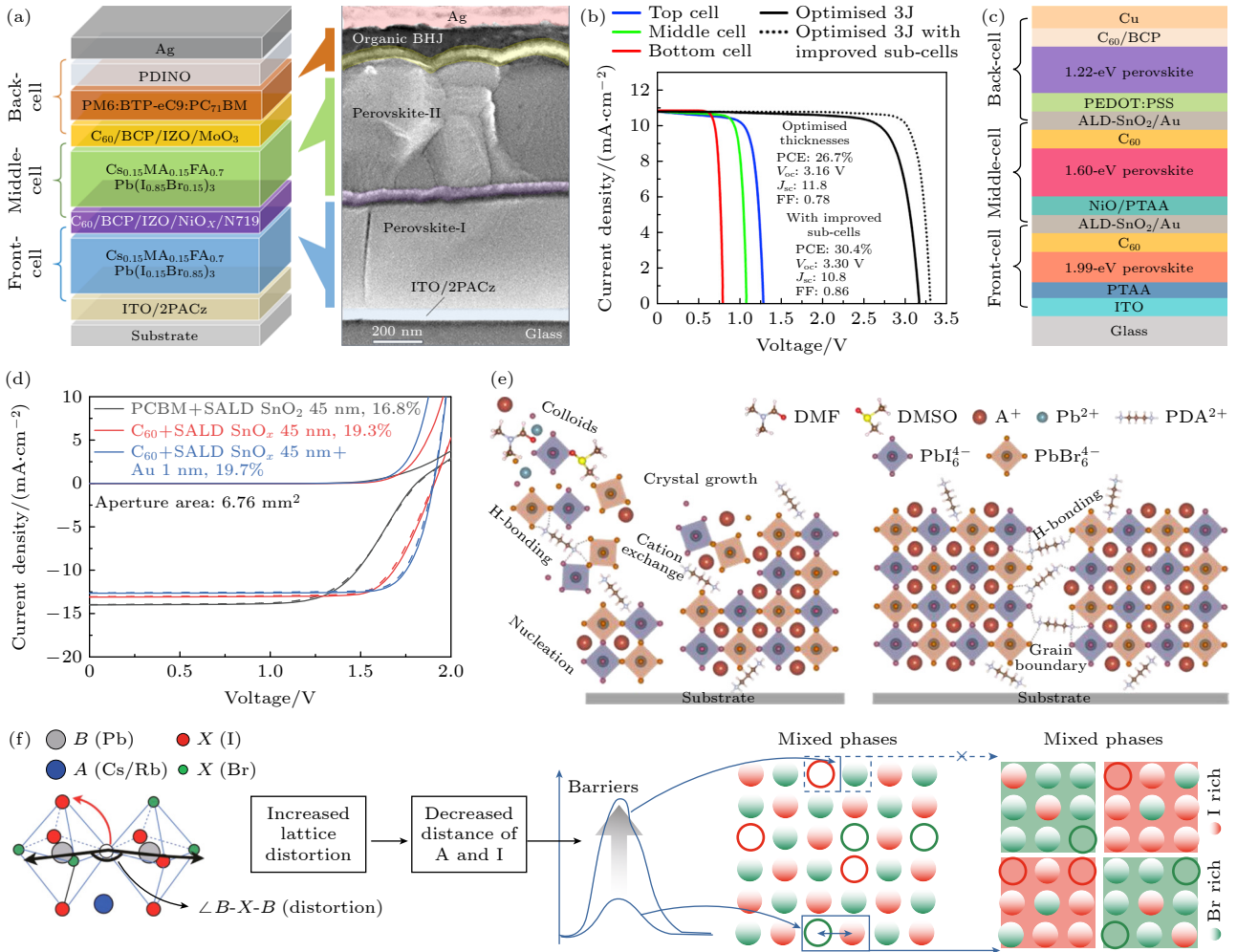


图 3 (a) 叠层太阳能电池结构及横截面 SEM 图像<sup>[74]</sup>; (b) 子电池及叠层太阳能电池  $J$ - $V$  曲线<sup>[75]</sup>; (c) 全钙钛矿叠层太阳能电池结构<sup>[77]</sup>; (d) 叠层太阳能电池在暗态和光照下的  $J$ - $V$  曲线<sup>[76]</sup>; (e) 钙钛矿前驱体结晶过程示意图<sup>[79]</sup>; (f) 钙钛矿的相偏析抑制机制示意图<sup>[78]</sup>

Fig. 3. (a) Schematic structure of tandem solar cells and cross sectional SEM image<sup>[74]</sup>; (b)  $J$ - $V$  curves of sub-cells and three-junction tandem solar cell<sup>[75]</sup>; (c) schematic structure of all perovskite triple-junction tandem solar cells<sup>[77]</sup>; (d)  $J$ - $V$  curves of tandem solar cells in dark state and light<sup>[76]</sup>; (e) schematics of perovskite precursors during the crystallization process<sup>[79]</sup>; (f) schematic illustration of the suppression mechanism of light-induced phase segregation<sup>[78]</sup>.

分别为  $\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17}\text{Pb}(\text{Br}_{0.7}\text{I}_{0.3})_3$  (1.94 eV)、 $\text{MAPbI}_3$  (1.57 eV) 和  $\text{MAPb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{I}_3$  (1.34 eV). 为了稳定的宽带隙钙钛矿, 他们在宽带隙钙钛矿前驱体中加入 2% 的钾离子来抑制离子迁移, 减少回滞行为, 并使用氢碘酸和氢溴酸作为添加剂实现微米范围内的表观晶粒. 最终制备的器件效率为 6.7%, 开路电压为 2.83 V. 同时, 他们通过光学和电子模拟, 预测出该三结叠层电池可以实现 26.7% 的能量转换效率 (图 3(b)), 该电池除电极外的所有活性层均由溶液处理制成, 表明了采用大规模、低成本、可印刷的技术制备多结全钙钛矿叠层电池的可能性. 2020 年, 荷兰埃因霍芬理工大学的 Janssen 团队<sup>[76]</sup> 针对中间互连层和溶剂工程继续展开研究, 优化了钙钛矿的两步法制备工艺并设计了低电阻

率的中间互连层. 采用 C<sub>60</sub> 代替 PCBM, 并在原子层沉积的 SnO<sub>2</sub> 和 PEDOT:PSS (聚 (3, 4-乙烯二氧噻吩): 聚 (苯乙烯磺酸盐)) 之间插入超薄金层以改善电流匹配. 如图 3(d) 所示, 他们采用禁带宽度为 1.73, 1.57, 1.23 eV 的钙钛矿材料构建的全钙钛矿三结叠层太阳能电池实现了 16.8% 的转换效率. 同年, 南京大学谭海仁课题组<sup>[77]</sup> 开发了与钙钛矿层溶液加工兼容的中间互连层, 如图 3(c) 所示, 他们设计制备了 NiO<sub>x</sub>/PTAA (聚 [ 双 (4-苯基) (2, 4, 6-三甲苯基) 胺 ]) 双层结构作为中间子电池的空穴传输层, 较厚的 NiO<sub>x</sub> 层有助于覆盖底电池的粗糙表面, 增加 PTAA 层的覆盖度, 从而获得了致密且具有优良导电性的互连层; 同时优化了金层的厚度, 以最小化光吸收损失; 实现了最理想的禁带宽



度匹配,即采用禁带宽度为 1.99, 1.60, 1.22 eV 的钙钛矿材料来构建叠层电池. 另外, 采用  $\text{Pb}(\text{SCN})_2$  作为添加剂改善宽带隙钙钛矿的晶体质量并增加晶粒尺寸. 最终基于溶液法制备的全钙钛矿叠层太阳能电池获得了 81% 的填充因子和 20.1% 的能量转换效率. 该器件在氮气手套箱中暗态保存 325 天后, 可以保持初始效率的 95%. 综上所述, 全钙钛矿叠层电池的初期研究主要针对能带匹配和中间互连层的结构进行优化研究, 伴随着双结叠层电池性能的不断提升, 三结叠层电池的性能也逐渐增加.

在取得初步成果之后, 人们开始关注三结叠层太阳能电池中顶部电池的光稳定性问题, 即宽带隙钙钛矿材料容易发生光致相分离, 显著地影响器件性能和长期稳定性. 加拿大多伦多大学 Sargent 团队<sup>[78]</sup>提出调控晶格畸变可以抑制碘溴混合钙钛矿中的光致相偏析问题. 减小 A 位阳离子和碘离子之间的距离会增加离子迁移能垒, 如图 3(f), 铷具有比铯更小的阳离子半径, 可以掺杂到无机钙钛矿晶格中, 并且铷掺杂含量的上限与溴的掺杂量成正相关. 因此用铷取代无机钙钛矿  $\text{CsPbI}_{1.75}\text{Br}_{1.25}$  中的部分铯可以增加钙钛矿的光稳定性. 他们将该材料应用到全钙钛矿三结叠层太阳能电池中, 制备的器件展现的开路电压为 3.21 V, 效率达到了 24.3%, 且在最大功率点运行 420 h 后, 仍能保持其初始效率的 80%. 该研究为抑制宽带隙钙钛矿太阳能电池的光诱导相偏析现象提供了思路, 有效地提高了多结叠层太阳能电池的能量转换效率和稳定性. 2023 年, 该课题组联合荷兰埃因霍芬理工大学的 Janssen 团队<sup>[79]</sup>提出卤化二铵盐的体相和界面双重修饰策略, 旨在改善 2.0 eV 钙钛矿体相和界面的卤化物均匀性, 以减少能量损失. 他们将丙二铵离子掺入宽带隙钙钛矿中, 优化薄膜结晶生长过程, 改善卤素离子的均匀性, 同时丙二铵离子在晶界附近的钝化效应大大抑制了钙钛矿/电荷传输层界面的非辐射复合(图 3(e)). 基于 1.97 eV 的宽带隙钙钛矿材料构筑的单结反式钙钛矿电池效率为 15.3%, 达到 S-Q 极限的 86%, 同时开路电压达到了 1.44 V. 将 1.97 eV 钙钛矿与 1.61 eV 和 1.25 eV 的钙钛矿吸光层结合在一起, 构筑的三结叠层电池展现了 3.33 V 的开路电压和 25.1% 的能量转换效率(认证效率为 23.87%). 因此, 改善宽带隙钙钛矿薄膜质量和提升宽带隙钙钛矿子电池的光电性能是提升三结叠层电池的重要课题.

### 3.3 钙钛矿/钙钛矿/硅太阳电池

早在 2018 年, 瑞士联邦理工学院的 Ballif 团队<sup>[67]</sup>就已验证了钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳电池的概念的可行性. 他们改变了钙钛矿吸收层的带隙和中间互连层的厚度, 通过蒸发-旋涂工艺制备了光学带隙为 1.53—1.55 eV 和 1.77—1.80 eV 的钙钛矿  $\text{CsFAPbIBr}$  (图 4(a)). 为了合理分配电流, 他们通过改变铯和溴的含量, 将顶部电池吸收边缘由 1.77 eV 略微蓝移至 1.80 eV, 将中间电池的吸收边缘由 1.55 eV 略微红移至 1.53 eV. 同时降低顶电池的钙钛矿层厚度, 进一步减小其吸收以增加中间电池的电流密度. 最终将三结电池的短路电流密度从 7.7  $\text{mA}/\text{cm}^2$  提高到 9.6  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , 并实现了高达 2.69 V 的开路电压, 取得了 14.0% 的能量转换效率. 直至 2022 年, 钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池才再次取得突破性进展, 悉尼大学的 Ho-Baillie 团队<sup>[80]</sup>报道了面积为 1.03  $\text{cm}^2$ , 效率超过 20% 的三结叠层电池, 电池的开路电压为 2.74 V, 填充因子为 86%, 这是三结叠层光伏的一个重要里程碑. 在该研究中, 他们使用无甲胺的 1.55 eV 的纯碘基钙钛矿  $\text{Cs}_{0.1}\text{FA}_{0.9}\text{PbI}_3$  构建中间层电池, 采用 1.90 eV 的混合卤化物钙钛矿  $\text{Cs}_{0.2}\text{FA}_{0.8}\text{Pb}(\text{I}_{0.45}\text{Br}_{0.55})_3$  构建顶电池. 同时对于顶电池开发了 MeO-2PACz/溅射  $\text{NiO}_x$  作为空穴传输层(图 4(b)), 其中 MeO-2PACz 是 [2-(3, 6-二甲氧基-9H-吡啶-9-基) 乙基] 膦酸. 与仅使用  $\text{NiO}_x$  的器件相比, MeO-2PACz 和溅射  $\text{NiO}_x$  (非溶液处理的  $\text{NiO}_x$ ) 的组合增强了三结电池的性能. 对于电子传输层, 采用  $\text{SnO}_2/\text{C}_{60}$  组合与 1 nm 厚的 LiF 层, 同时采用 20 nm ITO 和超薄金作为子电池间的连接层, 最后为了增加抗反射和光捕获能力, 蒸镀 PDMS(聚二甲氧硅烷) 层, 保证了合理的电流匹配. 以上内容表明三结叠层电池中光管理尤为重要.

除了合理的电流分配外, 顶部钙钛矿溶剂对中间钙钛矿的溶解也是一个关键性问题. 对此, 2022 年韩国首尔国立大学的 Kim 课题组<sup>[69]</sup>采用乙腈和甲胺的乙醇溶液作为钙钛矿前驱体的混合溶剂, 与传统溶剂 DMF/DMSO 相比, 该溶剂体系具有较强的挥发性, 可避免在制备顶电池时溶剂渗透溶解已经制备好的中间电池, 实现在没有原子沉积的致密保护层的情况下构建叠层电池. 为了增强钙钛矿薄膜结晶度和光吸收能力, 研究者通过添加

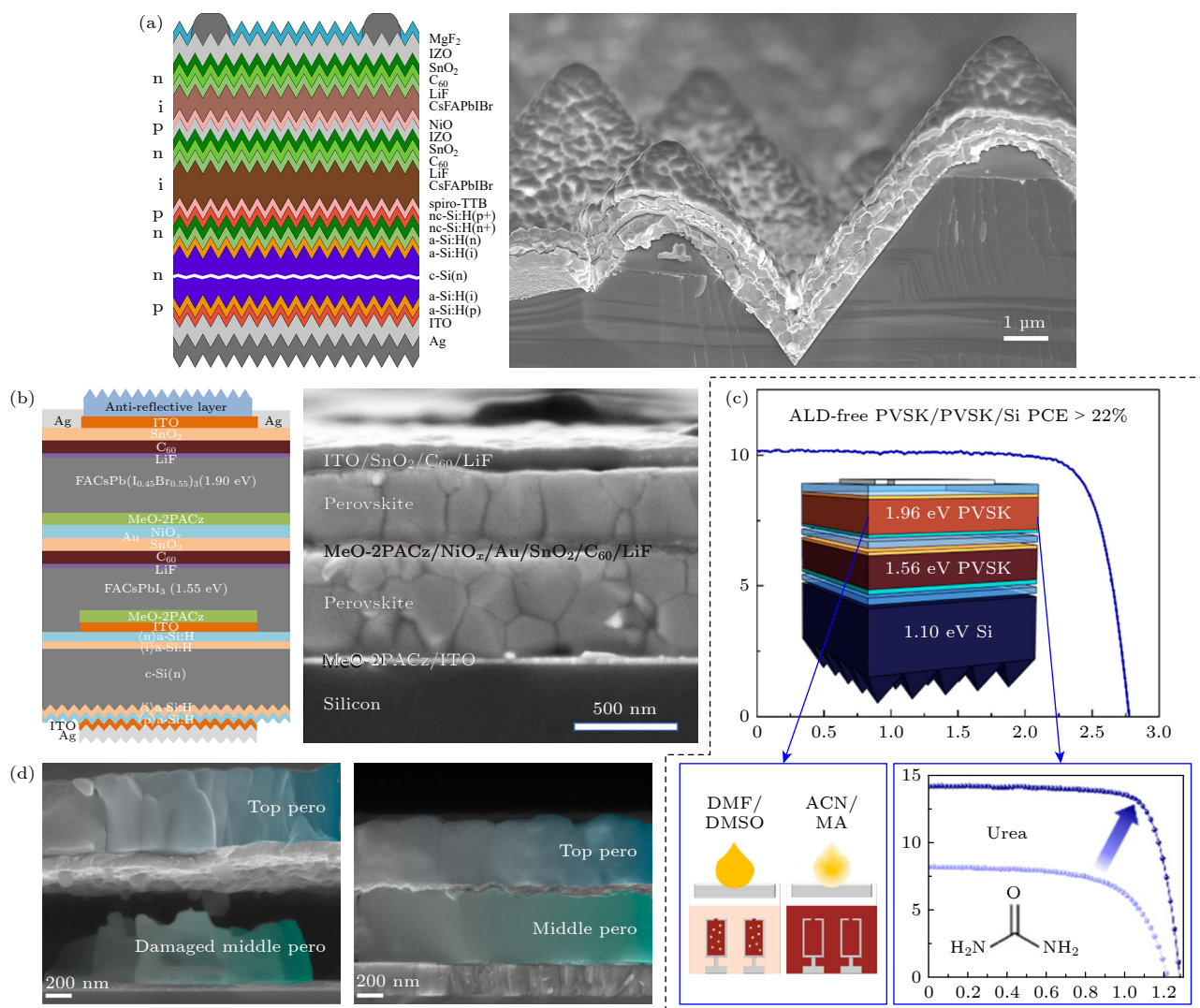


图 4 (a) 叠层太阳能电池结构及截面 SEM 图像<sup>[67]</sup>; (b) 叠层太阳能电池结构及截面 SEM 图像<sup>[80]</sup>; (c) 性能最佳的叠层太阳能电池  $J$ - $V$  曲线, 插图为叠层太阳能电池结构示意图<sup>[69]</sup>; (d) 反溶剂沉积方法和气淬技术制备的钙钛矿电池横截面 SEM 图像<sup>[81]</sup>

Fig. 4. (a) Schematic structure of tandem solar cells and cross sectional SEM images<sup>[67]</sup>; (b) schematic structure of tandem solar cells and cross sectional SEM images<sup>[80]</sup>; (c)  $J$ - $V$  curve of the champion tandem solar cell, illustrated with schematic structure of the tandem solar cell<sup>[69]</sup>; (d) cross sectional SEM image of perovskite cell prepared by anti-solvent dripping and gas quenching method<sup>[81]</sup>.

尿素, 将禁带宽度为 1.96 eV 顶电池的能量转换效率从 6.4% 提高至 13.9%。在高挥发性溶剂和尿素添加剂的协同作用下, 三结叠层电池展示出 22.23% 的能量转化效率 (图 4(c))。同年, 德国 Fraunhofer 太阳能研究所的 Heydarian 团队<sup>[81]</sup> 提出气体淬火的策略, 并动态旋涂钙钛矿溶液, 防止中间钙钛矿的溶解, 实现无损沉积顶部钙钛矿 (图 4(d))。中间钙钛矿吸收层成分为 Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.9</sub>MA<sub>0.1</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.95</sub>Br<sub>0.05</sub>)<sub>3</sub>, 带隙为 1.56 eV, 而顶部钙钛矿吸收层是 Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.55</sub>MA<sub>0.45</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.55</sub>Br<sub>0.45</sub>)<sub>3</sub>, 带隙为 1.83 eV。该器件显示出 2.86 V 的开路电压, 能量转换效率超过 20.0%。沙特阿卜杜拉国王科技大学 Wolf 团队<sup>[82]</sup> 进一步提出双添加剂策略, 如图 5(a)

所示, 采用硫氰酸钾和碘化甲胺共同修饰 2.0 eV 的 Cs<sub>0.1</sub>FA<sub>0.9</sub>PbBr<sub>2.1</sub>I<sub>0.9</sub> 钙钛矿层, 其中硫氰酸根可以扩大晶粒尺寸, 钝化缺陷。钾离子可以固定卤化物, 防止卤化物空位的形成, 甲胺离子通过双置换反应消除钙钛矿薄膜中残留的硫氰酸根, 抑制相偏析, 稳定顶部电池, 最终 2.0 eV 的宽带隙单节钙钛矿电池效率为 15.0%, 开路电压为 1.38 V, 连续光照 300 min 后效率保持初始值的 98%。采用的中间钙钛矿吸收层为 Rb<sub>0.05</sub>Cs<sub>0.1</sub>FA<sub>0.85</sub>PbI<sub>3</sub>, 带隙为 1.52 eV。传统超薄金连接层在光响应区域内吸收严重, 限制中间电池的短路电流密度, 为了平衡顶部电池和中间电池的电流分配, 该团队采用溅射 IZO 代替金, 最终制备的面积为 1 cm<sup>2</sup> 的三结叠层



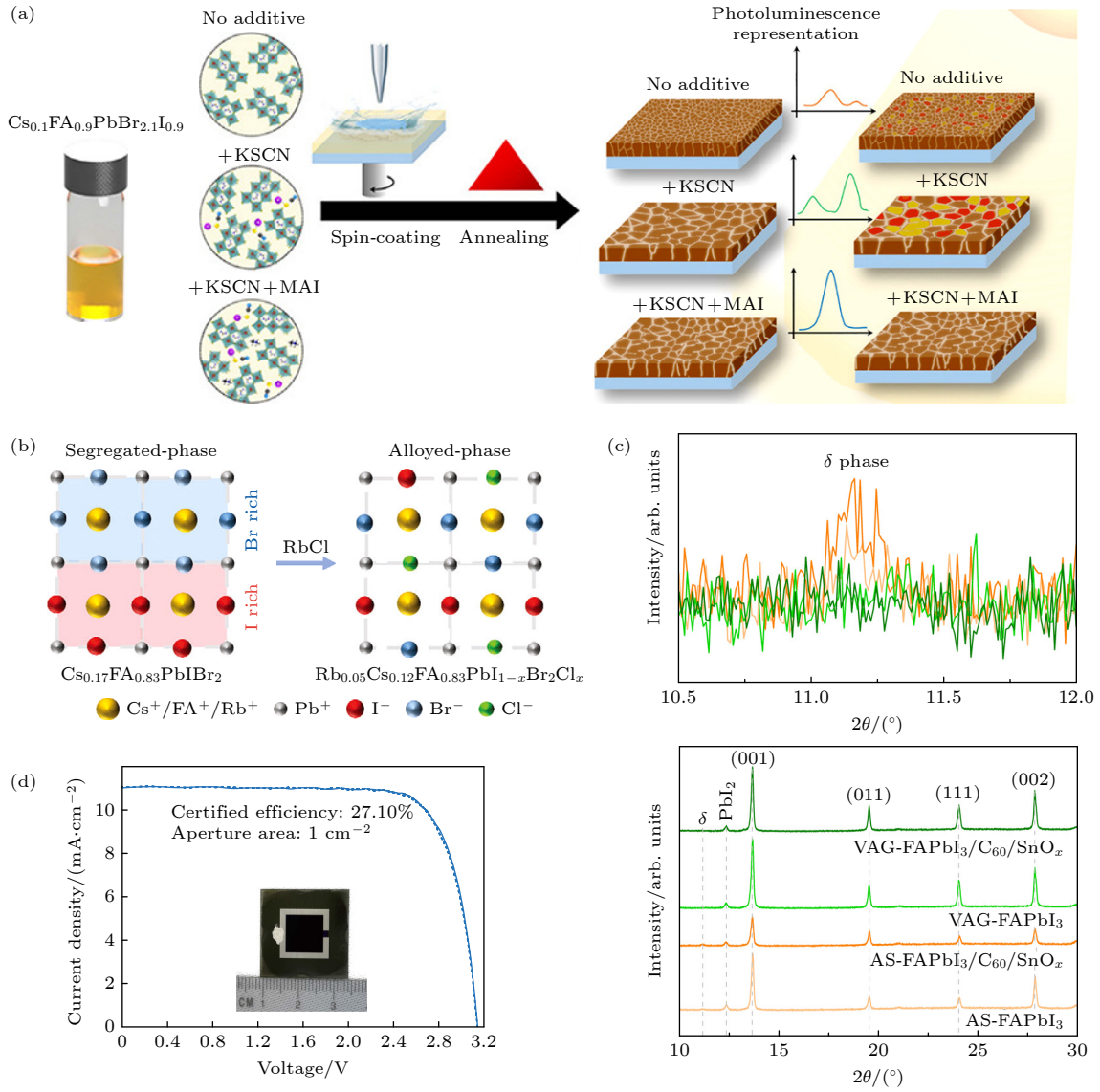


图 5 (a) 添加剂工程工作机理示意图<sup>[82]</sup>; (b) 宽带隙钙钛矿混合相和分离相示意图<sup>[83]</sup>; (c) 薄膜的 XRD 图<sup>[84]</sup>; (d) 经认证的叠层太阳能电池  $J$ - $V$  曲线<sup>[85]</sup>

Fig. 5. (a) Schematic diagram of the working mechanism of additive engineering<sup>[82]</sup>; (b) illustration of the mixed-phase and segregated-phase of wide-bandgap perovskites<sup>[83]</sup>; (c) XRD pattern of film<sup>[84]</sup>; (d) certified tandem solar cells  $J$ - $V$  curves<sup>[85]</sup>.

器件开路电压达到 3.04 V, 电流约 12 mA/cm<sup>2</sup>, 效率超过 26%. 该器件在氮气手套箱 85 °C 的热板上老化 1000 h 后, 仍然保持 88.5% 的初始效率.

电子科技大学刘明侦团队<sup>[83]</sup>提出在宽带隙钙钛矿  $\text{Rb}_{0.05}\text{Cs}_{0.12}\text{FA}_{0.83}\text{PbI}_{1-x}\text{Br}_2\text{Cl}_x$  ( $0 < x < 0.05$ ) 中掺杂小离子半径的铷离子和氯离子, 显著抑制了卤化物偏析, 提高了晶体质量, 减少了宽禁带钙钛矿内部的非辐射复合缺陷密度, 实现 A 位阳离子和 X 位卤素离子的均匀分布 (图 5(b)), 同时增加了表面电位的均匀性, 从而获得高质量宽带隙钙钛矿材料. 同时应用  $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.98}\text{MA}_{0.02})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.98}\text{Br}_{0.02})_3$  (约 1.53 eV) 作为中间带隙钙钛矿薄膜, 面

积为 1.04 cm<sup>2</sup> 的三结叠层电池展现的开路电压接近 3.0 V, 功率转换效率为 25.0% (认证效率为 24.19%), 未封装的电池在最大功率点下连续工作 100 h 后, 能量转换效率下降到初始值的 86.8%. 卡尔斯鲁厄理工学院 Paetzold 团队<sup>[84]</sup>开发了一种高性能中间钙钛矿子电池, 采用真空辅助生长技术获得稳定的高质量 (无皱纹、裂纹和针孔) 纯  $\alpha$  相  $\text{FAPbI}_3$  钙钛矿薄膜 (图 5(c)), 带隙为 1.52 eV 接近最佳模拟值. 结合宽带隙  $\text{Cs}_{0.2}\text{FA}_{0.8}\text{Pb}(\text{I}_{0.5}\text{Br}_{0.5})_3$  (1.84 eV) 钙钛矿顶部电池, 构筑的三结叠层电池功率转换效率为 24.4%, 短路电流密度为 11.6 mA/cm<sup>2</sup>, 开路电压为 2.84 V. 在 85 °C 的暗态手套箱中储存 1081 h

后, 未封装三结器件仍可保留高达 96.6% 的初始效率. 新加坡国立大学的侯毅团队<sup>[85]</sup>提出采用拟卤化物氰酸根替代溴离子, 其有效离子半径 (1.97 Å) 与溴化物 (1.95 Å) 相当. 结果表明氰酸根可以进入钙钛矿晶格中, 产生显著的晶格畸变, 促进碘离子和溴离子的均匀分布. 基于氰酸根的钙钛矿结构表现出较强的缺陷形成能和较低的非辐射复合损失. 最终构筑的反式结构钙钛矿 (1.93 eV) 单结器件展现了 1.422 V 的开路电压, 开路电压与填充因子乘积超过 Shockley-Queisser 极限的 80%. 最终获得效率为 27.62% (图 5(d), 认证效率为 27.10%) 的钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池, 面积为 1 cm<sup>2</sup>. 以上结果再次表明, 优化宽带隙钙钛矿子电池的光电性能可显著提升三结叠层电池的能量转换效率.

## 4 总结与展望

本文综述了钙钛矿基三结叠层太阳能电池的研究进展. 表 1 总结了当前三结太阳能电池中顶部钙钛矿吸收层的组成和带隙, 及各单结太阳能电池的光伏性能. 表 2 汇总了钙钛矿/钙钛矿/有机、全钙钛矿和钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池的光电参数, 它们的最高效率分别是 19.4%<sup>[75]</sup>, 23.87%<sup>[78]</sup> 和 27.1%<sup>[85]</sup>. 该结果证明了三结电池的研究价值, 但该效率仍然低于它们的理论效率极限, 甚至低于相应单结电池效率. 因此, 探讨进一步提升电池性能

的研究方向至关重要.

在开路电压方面, 根据模拟计算<sup>[18]</sup>, 全钙钛矿和钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池的理论开路电压分别为 3.54 V 和 3.24 V. 而目前已经达到的开路电压分别为 3.33 V 和 3.13 V. 考虑到宽带隙钙钛矿子电池存在较高的开路电压损失, 因此, 在未来需通过组分工程、添加剂工程、结晶调控和界面钝化来获得高质量宽带隙钙钛矿薄膜<sup>[86–89]</sup>. 另外, 传统电荷传输材料与宽带隙的钙钛矿材料之间的能带匹配问题尚未得到充分研究<sup>[90]</sup>. 此外, 开发无光电损耗的中间互连层对实现高开路电压也至关重要<sup>[91]</sup>. 在短路电流密度方面, 全钙钛矿和钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池的最大短路电流密度分别可达到 12.0 mA/cm<sup>2</sup> 和 14.1 mA/cm<sup>2</sup>. 然而, 这两种结构的实际最大短路电流密度值仍低于预期, 全钙钛矿为 9.7 mA/cm<sup>2</sup>, 钙钛矿/钙钛矿/硅叠层太阳能电池为 11.9 mA/cm<sup>2</sup>. 造成该现象主要有两个原因, 一方面, 三结叠层太阳能电池有多个中间互连层, 引入寄生吸收<sup>[92]</sup>, 导致最终器件的短路电流密度降低. 为了使短路电流密度最大化, 需要采用高透明度、厚度适中的材料作为电极、中间互连层和电荷传输层. 另一方面, 目前的三结叠层电池尚未能采用最佳的带隙组合. 钙钛矿/钙钛矿/硅太阳能电池需要进一步降低中间电池钙钛矿的禁带宽度 (采用 FAPbI<sub>3</sub> 或含锡钙钛矿)<sup>[93]</sup>, 钙钛矿/钙钛矿/有机太阳能电池需要降低有机吸收层的禁带

表 1 单节宽带隙钙钛矿太阳能电池光伏性能汇总表

Table 1. Summary of photovoltaic performance of single wide-band gap perovskite solar cells.

| 组分                                                                                                                                 | 禁带宽度/eV | 开路电压/V | 短路电流密度/(mA·cm <sup>-2</sup> ) | 填充因子/% | 能量转换效率/% | Ref. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|-------------------------------|--------|----------|------|
| Cs <sub>0.15</sub> MA <sub>0.15</sub> FA <sub>0.70</sub> Pb(I <sub>0.15</sub> Br <sub>0.85</sub> ) <sub>3</sub>                    | 2.05    | 1.27   | 9.4                           | 70.4   | 8.4      | [74] |
| FA <sub>0.83</sub> Cs <sub>0.17</sub> Pb(Br <sub>0.7</sub> I <sub>0.3</sub> ) <sub>3</sub>                                         | 1.94    | 1.28   | 11.9                          | 76.0   | 11.6     | [75] |
| Cs <sub>0.2</sub> FA <sub>0.8</sub> PbI <sub>0.9</sub> Br <sub>2.1</sub>                                                           | 1.73    | 1.07   | 9.9                           | 76.0   | 8.1      | [76] |
| Cs <sub>0.2</sub> FA <sub>0.8</sub> PbI <sub>0.9</sub> Br <sub>2.1</sub>                                                           | 1.99    | 1.262  | 11.2                          | 73.5   | 10.4     | [77] |
| Rb <sub>0.15</sub> Cs <sub>0.85</sub> PbI <sub>1.75</sub> Br <sub>1.25</sub>                                                       | 2.0     | 1.30   | 12.4                          | 84.7   | 13.6     | [78] |
| Cs <sub>0.15</sub> FA <sub>0.85</sub> Pb(I <sub>0.4</sub> Br <sub>0.6</sub> ) <sub>3</sub>                                         | 1.97    | 1.44   | 12.8                          | 83.0   | 15.3     | [79] |
| CsFAPbIBr                                                                                                                          | 1.8     | \      | \                             | \      | \        | [67] |
| Cs <sub>0.2</sub> FA <sub>0.8</sub> Pb(I <sub>0.45</sub> Br <sub>0.55</sub> ) <sub>3</sub>                                         | 1.90    | 1.09   | 11.7                          | 71     | 9.1      | [80] |
| MAPb(I <sub>0.5</sub> Br <sub>0.35</sub> Cl <sub>0.15</sub> ) <sub>3</sub>                                                         | 1.96    | 1.28   | 14.16                         | 76.6   | 13.88    | [69] |
| Cs <sub>0.05</sub> (FA <sub>0.55</sub> MA <sub>0.45</sub> ) <sub>0.95</sub> Pb(I <sub>0.55</sub> Br <sub>0.45</sub> ) <sub>3</sub> | 1.83    | 1.12   | 13.6                          | 74.6   | 11.3     | [81] |
| Cs <sub>0.1</sub> FA <sub>0.9</sub> PbBr <sub>2.1</sub> I <sub>0.9</sub>                                                           | 1.98    | 1.38   | 14.0                          | 76.6   | 15.0     | [82] |
| Rb <sub>0.05</sub> Cs <sub>0.12</sub> FA <sub>0.83</sub> PbI <sub>0.95</sub> Cl <sub>0.05</sub> Br <sub>2</sub>                    | 1.98    | 1.33   | 13.05                         | 76.7   | 13.4     | [83] |
| FA <sub>0.8</sub> Cs <sub>0.2</sub> Pb(I <sub>0.5</sub> Br <sub>0.5</sub> ) <sub>3</sub>                                           | 1.84    | 1.27   | 16.4                          | 77.0   | 16.0     | [84] |
| FA <sub>0.60</sub> MA <sub>0.15</sub> Cs <sub>0.25</sub> Pb(I <sub>0.45</sub> Br <sub>0.5</sub> OCN <sub>0.05</sub> ) <sub>3</sub> | 1.93    | 1.422  | 14.18                         | 83.79  | 16.9     | [85] |

表 2 单片三结钙钛矿基叠层太阳能电池光伏性能汇总表  
Table 2. Summaries for PV performance of monolithic triple-junction perovskite-based tandem solar cells.

| 类型                  | 宽带隙                                                                                                                                              | 中间带隙                                                                                                                                             | 窄带隙                                                                                                                                           | 开路电压/V | 短路电流密度/(mA·cm <sup>-2</sup> ) | 填充因子/% | 正扫/反扫效率/% | 认证效率/% | 面积/cm <sup>2</sup> | Ref. |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------|--------|-----------|--------|--------------------|------|
| 钙钛矿/<br>钙钛矿/<br>有机  | Cs <sub>0.15</sub> MA <sub>0.15</sub> FA <sub>0.70</sub> Pb<br>(I <sub>0.15</sub> Br <sub>0.85</sub> ) <sub>3</sub> (2.05 eV)                    | Cs <sub>0.15</sub> MA <sub>0.15</sub> FA <sub>0.70</sub> Pb<br>(I <sub>0.85</sub> Br <sub>0.15</sub> ) <sub>3</sub> (1.62 eV)                    | PM6:BTTP-eC9:PCBM<br>(1.33 eV)                                                                                                                | 3.03   | 9.1                           | 70.4   | 19.4      | 19.2   | 0.1                | [74] |
|                     | FA <sub>0.83</sub> Cs <sub>0.17</sub> Pb(Br <sub>0.70</sub> I <sub>0.30</sub> ) <sub>3</sub><br>(1.94 eV)                                        | MAPbI <sub>3</sub> (1.57 eV)                                                                                                                     | MAPb <sub>0.75</sub> Sn <sub>0.25</sub> I <sub>3</sub><br>(1.34 eV)                                                                           | 2.7    | 8.3                           | 0.43   | 6.7       | 6.7    | 0.092              | [75] |
|                     | Cs <sub>0.1</sub> (FA <sub>0.66</sub> MA <sub>0.34</sub> ) <sub>0.9</sub><br>PbI <sub>2</sub> Br (1.73 eV)                                       | FA <sub>0.66</sub> MA <sub>0.34</sub><br>PbI <sub>2.85</sub> Br <sub>0.15</sub> (1.57 eV)                                                        | FA <sub>0.66</sub> MA <sub>0.34</sub><br>Pb <sub>0.5</sub> Sn <sub>0.5</sub> I <sub>3</sub> (1.23 eV)                                         | 2.78   | 7.4                           | 81     | 17.3      | 17.0   | 0.067              | [76] |
|                     | Cs <sub>0.2</sub> FA <sub>0.8</sub> PbI <sub>0.9</sub> Br <sub>2.1</sub><br>(1.99 eV)                                                            | Cs <sub>0.05</sub> FA <sub>0.95</sub> Pb<br>I <sub>2.55</sub> Br <sub>0.45</sub> (1.60 eV)                                                       | MA <sub>0.3</sub> FA <sub>0.7</sub> Pb <sub>0.5</sub><br>Sn <sub>0.5</sub> I <sub>3</sub> (1.22 eV)                                           | 2.80   | 8.8                           | 81     | 20.1      | 19.9   | 0.049              | [77] |
| 钙钛矿/<br>钙钛矿/<br>钙钛矿 | Rb <sub>0.15</sub> Cs <sub>0.85</sub> PbI <sub>1.75</sub> Br <sub>1.25</sub><br>(2.0 eV)                                                         | Cs <sub>0.05</sub> FA <sub>0.9</sub> MA <sub>0.05</sub> Pb<br>(I <sub>0.9</sub> Br <sub>0.1</sub> ) <sub>3</sub> (1.60 eV)                       | Cs <sub>0.05</sub> FA <sub>0.7</sub> MA <sub>0.25</sub> Pb <sub>0.5</sub><br>Sn <sub>0.5</sub> I <sub>3</sub> -0.05SnF <sub>2</sub> (1.22 eV) | 3.215  | 9.71                          | 77.93  | 24.33     | 23.29  | 0.049              | [78] |
|                     | Cs <sub>0.15</sub> FA <sub>0.85</sub> Pb(I <sub>0.4</sub> Br <sub>0.6</sub> ) <sub>3</sub><br>(1.97 eV)                                          | Cs <sub>0.05</sub> FA <sub>0.9</sub> MA <sub>0.05</sub> Pb<br>(I <sub>0.85</sub> Br <sub>0.15</sub> ) <sub>3</sub> (1.77 eV)                     | Cs <sub>0.05</sub> FA <sub>0.7</sub> MA <sub>0.25</sub><br>Pb <sub>0.5</sub> Sn <sub>0.5</sub> I <sub>3</sub> (1.22 eV)                       | 3.33   | 9.7                           | 78     | 25.1      | 23.87  | 0.049              | [79] |
|                     | CsFAPbI <sub>2</sub> Br (1.8 eV)                                                                                                                 | CsFAPbI <sub>2</sub> Br (1.53 eV)                                                                                                                | Si (1.10 eV)                                                                                                                                  | 2.688  | 7.7                           | 68.0   | 14.0      | 14.0   | 1.42               | [67] |
|                     | Cs <sub>0.2</sub> FA <sub>0.8</sub> Pb(I <sub>0.45</sub> Br <sub>0.55</sub> ) <sub>3</sub><br>(1.90 eV)                                          | Cs <sub>0.1</sub> FA <sub>0.9</sub> PbI <sub>3</sub> (1.55 eV)                                                                                   | Si (1.10 eV)                                                                                                                                  | 2.692  | 7.7                           | 58.7   | 12.1      | 20.1   | 1.03               | [80] |
| 钙钛矿/<br>钙钛矿/<br>硅   | MAPb(I <sub>0.5</sub> Br <sub>0.35</sub> Cl <sub>0.15</sub> ) <sub>3</sub><br>(1.96 eV)                                                          | Cs <sub>0.2</sub> MA <sub>0.05</sub> FA <sub>0.75</sub> PbI <sub>3</sub><br>(1.56 eV)                                                            | Si (1.10 eV)                                                                                                                                  | 2.78   | 10.18                         | 78.60  | 22.23     | 21.79  | 0.1875             | [69] |
|                     | Cs <sub>0.05</sub> (FA <sub>0.55</sub> MA <sub>0.45</sub> ) <sub>0.95</sub><br>Pb(I <sub>0.55</sub> Br <sub>0.45</sub> ) <sub>3</sub> (1.83 eV)  | Cs <sub>0.05</sub> (FA <sub>0.9</sub> MA <sub>0.1</sub> ) <sub>0.95</sub> Pb<br>(I <sub>0.95</sub> Br <sub>0.05</sub> ) <sub>3</sub> (1.56 eV)   | Si (1.10 eV)                                                                                                                                  | 2.87   | 8.9                           | 78.1   | 20.1      | 20.0   | 1.0                | [81] |
|                     | Cs <sub>0.1</sub> FA <sub>0.9</sub> PbBr <sub>2.1</sub> I <sub>0.9</sub> (1.98 eV)                                                               | Rb <sub>0.05</sub> Cs <sub>0.1</sub> FA <sub>0.85</sub> PbI <sub>3</sub><br>(1.52 eV)                                                            | Si (1.10 eV)                                                                                                                                  | 3.04   | 11.9                          | 72.9   | 26.4      | 25.5   | 1.0                | [82] |
|                     | Rb <sub>0.05</sub> Cs <sub>0.12</sub> FA <sub>0.83</sub> PbI <sub>0.95</sub><br>Cl <sub>0.05</sub> Br <sub>2</sub> (1.98 eV)                     | Cs <sub>0.05</sub> (FA <sub>0.98</sub> MA <sub>0.02</sub> ) <sub>0.95</sub> Pb<br>(I <sub>0.98</sub> Br <sub>0.02</sub> ) <sub>3</sub> (1.55 eV) | Si (1.10 eV)                                                                                                                                  | 2.995  | 11.76                         | 70.80  | 25.0      | 24.19  | 1.04               | [83] |
| 钙钛矿/<br>钙钛矿/<br>钙钛矿 | FA <sub>0.8</sub> Cs <sub>0.2</sub> Pb(I <sub>0.3</sub> Br <sub>0.5</sub> ) <sub>3</sub> (1.84 eV)                                               | FAPbI <sub>3</sub> (1.52 eV)                                                                                                                     | Si (1.10 eV)                                                                                                                                  | 2.84   | 11.6                          | 0.74   | 24.4      | 24.0   | 1.0                | [84] |
|                     | FA <sub>0.60</sub> MA <sub>0.15</sub> Cs <sub>0.25</sub> Pb<br>(I <sub>0.45</sub> Br <sub>0.5</sub> OCN <sub>0.05</sub> ) <sub>3</sub> (1.93 eV) | FA <sub>0.9</sub> Cs <sub>0.1</sub> PbI <sub>3</sub> (1.55 eV)                                                                                   | Si (1.10 eV)                                                                                                                                  | 3.132  | 11.58                         | 76.15  | 27.62     | 27.1   | 1.0                | [85] |



宽度,以期在叠层器件中实现更好的电流匹配. 除却提升电池性能,放大三结叠层电池的尺寸将是未来的首要研究方向. 鉴于三结叠层太阳能电池的复杂工艺,采用全蒸发技术的制备钙钛矿层和电荷传输层将是下一个焦点,这有利于构建大面积电池,增加良率和电池稳定性. 同时,伴随着柔性硅电池的出现,以及全钙钛矿叠层太阳电池和钙钛矿/钙钛矿/有机叠层电池的自身优势,制备柔性三结叠层太阳电池亦是一个重要发展方向,是进一步增加柔性电池功质比的重要策略.

最后,与三结叠层太阳电池的发展并行的精确表征对于提高测量可靠性和更好地了解这项新技术的局限性至关重要. 正确调整太阳模拟器的光谱<sup>[94]</sup>,使所有子电池产生与参考光谱下相同的电流,这一点尤为重要. 此外,目前在三结叠层太阳电池方面的研究主要集中在效率提升上,而对其稳定性研究较少. 随着能量转换效率不断增强,钙钛矿基太阳电池需要解决稳定性以实现未来商业化.

## 参考文献

- [1] Green M A, Ho-Baillie A, Snaith H J 2014 *Nat. Photonics* **8** 506
- [2] Luo X H, Liu X, Lin X S, Wu T H, Wang Y B, Han Q F, Wu Y Z, Segawa H, Han L Y 2024 *ACS Energy Lett.* **9** 1487
- [3] Liao J F, Wu W Q, Jiang Y, Zhong J X, Wang L Z, Kuang D B 2020 *Chem. Soc. Rev.* **49** 354
- [4] NREL, Best Research-Cell Efficiencies <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> [2023-10]
- [5] Meier J, Flückiger R, Keppner H, Shah A 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 860
- [6] Hörantner M T, Leijtens T, Ziffer M E, Eperon G E, Christoforo M G, McGehee M D, Snaith H J 2017 *ACS Energy Lett.* **2** 2506
- [7] Wang Y, Ye S Y, Lim J W M, Giovanni D, Feng M J, Fu J H, Krishnamoorthy H N S, Zhang Q N, Xu Q, Cai R, Sun T C 2023 *Nat. Commun.* **14** 6293
- [8] Marchat C, Williams R M 2024 *Photochem. Photobiol. Sci.* **23** 1
- [9] Bremner S P, Levy M Y, Honsberg C B 2008 *Prog. Photovoltaics* **16** 225
- [10] Yang J M, Bao Q Y, Shen L, Ding L M 2020 *Nano energy* **76** 105019
- [11] France R M, Geisz J F, Song T, Olavarria W, Young M, Kibbler A, Steiner M A 2022 *Joule* **6** 1121
- [12] Noh J H, Im S H, Heo J H, Mandal T N, Seok S I 2013 *Nano Lett.* **13** 1764
- [13] Yeom K M, Kim S U, Woo M Y, Noh J H, Im S H 2020 *Adv. Mater.* **32** 2002228
- [14] Zhang Y L, Chen X L, Zhou Z X, Zhao Y, Zhang X D 2021 *Acta Energetica Solaris Sin.* **42** 49 (in Chinese) [张云龙, 陈新亮, 周忠信, 赵颖, 张晓丹 2021 *太阳能学报* **42** 49]
- [15] Hou F H, Ren X Q, Guo H K, Ning X L, Wang Y L, Li T T, Zhu C J, Zhao Y, Zhang X D 2024 *Nano Energy* **124** 109476
- [16] Zhang Z C, Chen W J, Jiang X X, Cao J L, Yang H D, Chen H Y, Yang F, Shen Y X, Yang H Y, Cheng Q R, Chen X N, Tang X H, Kang S Q, Ou X M, Brabec C J, Li Y W, Li Y F 2024 *Nat. Energy* **9** 592
- [17] Wang X, Zhang D, Liu B Z, Wu X, Jiang X F, Zhang S F, Wang Y, Gao D P, Wang L N, Wang H L, Huang Z M, Xie X F, Chen T, Xiao Z G, He Q Y, Xiao S, Zhu Z L, Yang S F 2023 *Adv. Mater.* **35** 2305946
- [18] Shen H P, Walter D, Wu Y L, Fong K C, Jacobs D A, Duong T, Peng J, Weber K, White T P, Catchpole K R 2020 *Adv. Energy Mater.* **10** 1902840
- [19] Bastiani M D, Mirabelli A J, Hou Y, Gota F, Aydin E, Allen T G, Troughton J, Subbiah A S, Isikgor S F H, Liu J, Xu L J, Chen B, Kerschaver E V, Baran D, Fraboni B, Salvador M F, Paetzold U W, Sargent E H, De Wolf S 2021 *Nat. Energy* **6** 167
- [20] Shi Y T, Berry J J, Zhang F 2024 *ACS Energy Lett.* **9** 1305
- [21] Zhang H, Park N G 2024 *DeCarbon* **3** 100025
- [22] Mailoa J P, Bailie C D, Johlin E C, Hoke E T, Akey A J, Nguyen W H, McGehee M D, Buonassisi T 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 121105
- [23] Martinho F 2021 *Energy Environ. Sci.* **14** 3840
- [24] Cheng Y H, Ding L M 2021 *SusMat* **1** 324
- [25] Güter W, Schöne J, Philipps S P, Steiner M, Siefer G, Wekkeli A, Welser E, Oliva E, Bett A W, Dimroth F 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 223504
- [26] Lai H J, Zhao Q Q, Chen Z Y, Chen H, Chao P J, Zhu Y L, Lang Y W, Zhen N Z, Mo D, Zhang Y Z, He F 2020 *Joule* **4** 688
- [27] Zhang Z H, Li Z C, Meng L Y, Lien S Y, Gao P 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2001904
- [28] Tong J H, Jiang Q, Zhang F, Kang S B, Kim D H, Zhu K 2021 *ACS Energy Lett.* **6** 232
- [29] Montecucco R, Quadri E, Po R, Grancini G 2021 *Adv. Energy Mater.* **11** 2100672
- [30] Tong Y, Najar A, Wang L, Liu L, Du M Y, Yang J, Li J X, Wang K, Liu S Z 2022 *Adv. Sci.* **9** 2105085
- [31] Huang T Y, Tan S, Nuryyeva S, Yavuz I, Babbe F, Zhao Y P, Abdelsamie M, Weber M H, Wang R, Houk K N, Sutter-Fella C M, Yang Y 2021 *Sci. Adv.* **7** eabj1799
- [32] Correa-Baena J P, Lou Y Q, Brenner T M, Snider J, Sun S, Li X Y, Jensen M A, Hartono N T P, Nienhaus L, Wiegold S, Poindexter J R, Wang S, Meng Y S, Wang T, Lai B, Holt M V, Cai Z H, Bawendi M G, Huang L B, Buonassisi T, Fenning D P 2019 *Science* **363** 627
- [33] Enkhbayar E, Otgontamir N, Kim S Y, Lee J, Kim J H 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 35084
- [34] Stollerfoht M, Caprioglio P, Wolff C M, Márquez J A, Nordmann J, Zhang S S, Rothhardt D, Hörmann U, Amir Y, Redinger A, Kegelmann L, Zu F S, Albrecht S, Koch N, Kirchartz T, Saliba M, Unold T, Neher D 2019 *Energy Environ. Sci.* **12** 2778
- [35] Mahesh S, Ball J M, Oliver R D J, Mcmeekin D P, Nayak P K, Johnston M B, Snaith H J 2020 *Energy Environ. Sci.* **13** 258
- [36] Metcalf I, Sidhik S, Zhang H, Agrawal A, Persaud J, Hou J, Even J, Mohite A D 2023 *Chem. Rev.* **123** 9565
- [37] Li X, Aftab S, Abbas A, Hussain S, Aslam M, Kabir F, Abd-Rabbob H S M, Hegazy H H, Xu F, Ansari M Z 2023 *Nano Energy* **118** 108979
- [38] Mali S S, Patil J V, Shao J Y, Zhong Y W, Rondiya S R, Dzade N Y, Hong C K 2023 *Nat. Energy* **8** 989
- [39] Dong Z J, Li W P, Wang H L, Jiang X Y, Liu H C, Zhu L Q, Chen H N 2021 *Solar RRL* **5** 2100370

- [40] Kerner R A, Xu Z J, Larson B W, Rand B P 2021 *Joule* **5** 2273
- [41] Xu J X, Boyd C C, Yu Z J, Palmstrom A F, Witter D J, Larson B W, France R M, Werner J, Harvey S P, Wolf E J, Weigand W, Manzoor S, van Hest M F A M, Berry J J, Luther J M, Holman Z C, McGehee M D 2020 *Science* **367** 1097
- [42] Li Z X, Feng X Z, Chen X G, Liu X P, Dai S Y, Cai M L 2024 *Acta Energetica Solaris Sin.* **45** 30 (in Chinese) [李卓芯, 冯旭铮, 陈香港, 刘雪朋, 戴松元, 蔡墨朗 2024 *太阳能学报* **45** 30]
- [43] Wen J, Zhao Y C, Liu Z, Gao H, Lin R X, Wan S S, Ji C L, Xiao K, Gao Y, Tian Y X, Xie J, Brabec C J, Tan H R 2022 *Adv. Mater.* **34** 2110356
- [44] Walsh A 2015 *J. Phys. Chem. C* **119** 5755
- [45] Sala J, Heydarian M, Lammar S, Abdulaheem Y, Aernouts T, Hadipour A, Poortmans J 2021 *ACS Appl. Energy Mater.* **4** 6377
- [46] Reza K M, Gurung A, Bahrami B, Chowdhury A H, Ghimire N, Pathak R, Rahman S I, Laskar M A R, Chen K, Bobba R S, Lamsal B S, Biswas L K, Zhou Y, Logue B, Qiao Q 2021 *Solar RRL* **5** 2000740
- [47] Zhang S Y, Tang M C, Fan Y Y, Li R P, Nguyen N V, Zhao K, Anthopoulos T D, Hacker C A 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 34402
- [48] Xiao K, Lin R X, Han Q L, Hou Y, Qin Z Y, Nguyen H T, Wen J, Wei M Y, Yeddu V, Saidamiinov M I, Gao Y, Luo X, Wang Y R, Gao H, Zhang C F, Xu J, Zhu J, Sargent E H, Tan H R 2020 *Nat. Energy* **5** 870
- [49] Jiang Q, Tong J H, Scheidt R A, Wang X M, Louks A E, Xian Y M, Tirawat R, Palmstrom A F, Hautzinger M P, Harvey S P, Johnston S, Schelhas L T, Larson B W, Warren E L, Beard M C, Berry J J, Yan Y F, Zhu K 2022 *Science* **378** 1295
- [50] Jaysankar M, Qiu W, Bastos J, Tait J G, Debucquoy M, Paetzold U W, Cheynds D, Poortmans J 2016 *J. Mater. Chem. A* **4** 10524
- [51] Shen X Y, Gallant B M, Holzhey P, Smith J A, Elmestekawy K A, Yuan Z C, Rathnayake P V G M, Bernardi S, Dasgupta A, Kasparavicius E, Malinauskas T, Caprioglio P, Shargaieva O, Lin Y H, McCarthy M M, Unger E, Getautis V, Widmer-Cooper A, Herz L M, Snaith H J 2023 *Adv. Mater.* **35** 2211742
- [52] An Y D, Zhang N, Zeng Z X, Cai Y T, Jiang W L, Qi F, Ke L Y, Lin F R, Tsang S W, Shi T T, Jen A K Y, Yip H L 2024 *Adv. Mater.* **36** 2306568
- [53] Yu Y, Wang C L, Grice C R, Shrestha N, Zhao D W, Liao W Q, Guan L, Awni R A, Meng W W, Cimaroli A J, Zhu K, Ellingson R J, Yan Y F 2017 *ACS Energy Lett.* **2** 1177
- [54] Kim D H, Muzzillo C P, Tong J H, Palmstrom A F, Larson B W, Choi C, Harvey S P, Glynn S, Whitaker J B, Zhang F, Li Z, Lu H P, Van Hest M F A M, Berry J J, Mansfield L M, Huang Y, Yan Y F, Zhu K 2019 *Joule* **3** 1734
- [55] Thiesbrummel J, Peña-Camargo F, Brinkmann K O, Gutierrez-Partida E, Yang F J, Warby J, Albrecht S, Neher D, Riedl T, Snaith H J, Stolterfoht M, Lang F 2023 *Adv. Energy Mater.* **13** 2202674
- [56] Wang Y R, Zhang M, Xiao K, Lin R X, Luo X, Han Q L, Tan H R 2020 *J. Semicond.* **41** 051201
- [57] Chen J B, Wang D, Chen S, Hu H, Li Y, Huang Y L, Zhang Z Q, Jiang Z Y, Xu J M, Sun X Y, So S K, Peng Y J, Wang X Z, Zhu X J, Xu B M 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 43246
- [58] 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, Wolf S D 2021 *Joule* **5** 1566
- [59] Yu Y, Liu R, Liu C, Shi X L, Yu H, Chen Z G 2022 *Adv. Energy Mater.* **12** 2201509
- [60] Belisle R A, Bush K A, Bertoluzzi L, Gold-Parker A, Toney M F, McGehee M D 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 2694
- [61] Caprioglio P, Smith J A, Oliver R D J, Dasgupta A, Choudhary S, Farrar M D, Ramadan A J, Lin Y H, Greyson Christoforo M, Ball J M, Diekmann J, Thiesbrummel J, Zaininger K A, Shen X Y, Johnston M B, Neher D, Stolterfoht M, Snaith H J 2023 *Nat. Commun.* **14** 932
- [62] Eperon G E, Leijtens T, Bush K A, Prasanna R, Green T, Wang J T W, McMeekin D P, Volonakis G, Milot R L, May R, Palmstrom A, Slotcavage D J, Belisle R A, Patel J B, Parrott E S, Sutton R J, Ma W, Moghadam F, Conings B, Babayigit A, Boyen H G, Bent S, Giustino F, Herz L M, Johnston M B, McGehee M D, Snaith H J 2016 *Science* **354** 861
- [63] Zhang M R, Zhu Z W, Yang X Q, Yu T X, Yu X Q, Lu D, Li S F, Zhou D Y, Yang H 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 05881 (in Chinese) [张美荣, 祝曾伟, 杨晓琴, 于同旭, 郁晓琦, 卢获, 李顺峰, 周大勇, 杨辉 2023 *物理学报* **72** 05881]
- [64] Hossain M I, Saleque A M, Ahmed S, Saidjafarzoda I, Shahiduzzaman M, Qarony W, Knipp D, Biyikli N, Tsang Y H 2021 *Nano Energy* **79** 105400
- [65] Shao Y F, Zheng D X, Liu L, Liu J S, Du M Y, Peng L, Wang K, Liu S Z 2024 *ACS Energy Lett.* **9** 4892
- [66] Li H, Zhang W 2020 *Chem. Rev.* **120** 9835
- [67] Werner J, Sahli F, Fu F, Leon D J J, Walter A, Kamino B A, Niesen B, Nicolay S, Jeangros Q, Ballif C 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 2052
- [68] Nejand A B, Ritzer D B, Hu H, Schackmar F, Moghadamzadeh S, Feeney T, Singh R, Laufer F, Schmagel R, Azmi R, Kaiser M, Abzieher T, Gharibzadeh S, Ahlswede E, Lemmer U, Richards B S, Paetzold U W 2022 *Nat. Energy* **7** 620
- [69] Choi Y J, Lim S Y, Park J H, Ji S G, Kim J Y 2023 *ACS Energy Lett.* **8** 3141
- [70] Zhu Z J, Mao K T, Xu J X 2021 *J. Energy Chem.* **58** 219
- [71] Zhou Y, Jia Y H, Fang H H, Loi M A, Xie F Y, Gong L, Qin M C, Lu X H, Wong C P, Zhao N 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1803130
- [72] Brinkmann K O, Becker T, Zimmermann F, Kreusel C, Gahlmann T, Theisen M, Haeger T, Olthof S, Tüchtmantel C, Günster M, Maschwitz T, Göbelsamm F, Koch C, Hertel D, Caprioglio P, Peña-Camargo F, Perdigón-Toro L, Al-Ashouri A, Merten L, Hinderhofer A, Gomell L, Zhang S, Schreiber F, Albrecht S, Meerholz K, Neher D, Stolterfoht M, Riedl T 2022 *Nature* **604** 280
- [73] Eperon G E, Hörantner M T, Snaith H J 2017 *Nat. Rev. Chem.* **1** 0095
- [74] Isikgor F H, Maksudov T, Chang X, Adilbekva B, Ling Z H, Hadmojo W T, Lin Y B, Anthopoulos T D 2022 *ACS Energy Lett.* **7** 4469
- [75] Mcmeekin D P, Mahesh S, Noel N K, Klug M T, Lim J C, Warby J H, Ball J M, Herz L M, Johnston M B, Snaith H J 2019 *Joule* **3** 387
- [76] Wang J K, Zardetto V, Datta K, Zhang D, Wienk M M, Janssen R A J 2020 *Nat. Commun.* **11** 5254

- [77] Xiao K, Wen J, Han L, Lin R X, Gao Y, Gu S, Zang Y P, Nie Y F, Zhu J, Xu J, Tan H R 2020 *ACS Energy Lett.* **5** 2819
- [78] Wang Z W, Zeng L W, Zhu T, Chen H, Chen B, Kubicki D J, Balvanz A, Li C W, Maxwell A, Ugur E, Reis R D, Cheng M, Yang G, Subedi B, Luo D Y, Hu J H, Wang J K, Teale S, Mahesh S, Wang S S, Hu S Y, Jung E D, Wei M Y, Park S M, Grater L, Aydin E, Song Z N, Podraza N J, Lu Z H, Huang J S, Dravid V P, Wolf D S, Yan Y F, Grätzel M, Kanatzidis M G, Sargent E H 2023 *Nature* **618** 74
- [79] Wang J K, Zeng L W, Zhang D, Maxwell A, Chen H, Datta K, Caiazzo A, Remmerswaal W H M, Schipper N R M, Chen Z H, Ho K, Dasgupta A, Kusch G, Olleao R, Bellini L, Hu S F, Wang Z W, Li C W, Teale S, Grater L, Chen B, Wienk M M, Oliver R A, Snaith H J, Janssen R A J, Sargent E H 2023 *Nat. Energy* **9** 70
- [80] Zheng J H, Wang G L, Duan W Y, Mahmud M A, Yi H M, Xu C, Lambertz A, Bremner S, Ding K, Huang S, Ho-Baillie A W Y 2022 *ACS Energy Lett.* **7** 3003
- [81] Heydarian M, Heydarian M, Bett A J, Bivour M, Schindler F, Hermle M, Schubert M C, Schulze P S C, Borchert J, Glunz S W 2023 *ACS Energy Lett.* **8** 4186
- [82] Xu F Z, Aydin E, Liu J, Ugur E, Harrison G T, Xu L J, Vishal B, Yildirim B K, Wang M C, Ali R, Subbiah A S, Yazmaciyan A, Zhumagali S, Yan W B, Gao Y J, Song Z M, Li C W, Fu S, Chen B, UR Rehman A U, Babics M, Razaq A, Bastiani D M, Allen T G, Schwiingenschlögl U, Yan Y F, Lquai F, Sargent E H, Wolf S D 2024 *Joule* **8** 224
- [83] Li F M, Wu D, Shang L, Xia R, Zhang H R, Huang Z X, Gong J, Mao L, Zhang H, Sun Y Q, Yang T, Sun X G, Feng Z Q, Liu M Z 2024 *Adv. Mater.* **36** 2311595
- [84] Hu H, An S X, Li Y, Orooji S, Singh R, Schackmar F, Laufer F, Jin Q H, Feeney T, Diercks A, Gota F, Moghadamzadeh S, Pan T, Rienäcker M, Peibst R, Nejand B A, Paetzold U W 2024 *Energy Environ. Sci.* **17** 2800
- [85] Liu S C, Lu Y, Yu C, Li J, Luo R J, Guo R, Liang H M, Jia X K, Guo X, Wang Y D, Zhou Q L, Wang X, Yang S F, Sui M L, Müller-Buschbaum P, Hou Y 2024 *Nature* **628** 306
- [86] Guo Y X, Du S J, Hu X Z, Li G, Yu Z X, Guan H L, Wang S X, Jia P, Zhou H, Li C, Ke W J, Fang G J 2024 *Nano Energy* **126** 109612
- [87] Su S Q, Ying Z Q, Chen X K, Li X, Yang X, Ye J C 2024 *Acta Energiae Solaris Sin.* **45** 23 (in Chinese) [苏诗茜, 应智琴, 陈邢凯, 李鑫, 杨熹, 叶继春 2024 *太阳能学报* **45** 23]
- [88] Cui X H, Xu Q J, Shi B, Hou F H, Zhao Y, Zhang X D 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 207401 (in Chinese) [崔兴华, 许巧静, 石标, 侯福华, 赵颖, 张晓丹 2020 *物理学报* **69** 207401]
- [89] Yang H D, Chen W J, Yu Y, Shen Y X, Yang H Y, Li X Q, Zhang B, Chen H Y, Cheng Q R, Zhang Z C, Qin W, Chen J D, Tang J X, Li Y W, Li Y F 2023 *Adv. Mater.* **35** 2208604
- [90] Eggemann H J, Patel J B, Johnston M B, Herz L M 2020 *Nat. Commun.* **11** 5525
- [91] An S C, Chen P R, Hou F H, Wang Q, Pan H, Chen X L, Lu X N, Zhao Y, Huang Q, Zhang X D 2020 *Solar Energy* **196** 409
- [92] Yan N, Gao Y, Yang J J, Fang Z M, Feng J S, Wu X J, Chen T, Liu S Z 2023 *Angew. Chem. Int. Ed.* **62** e202216668
- [93] Luo X H, Wu T H, Wang Y B, Lin X S, Su H Z, Han Q F, Han L Y 2021 *Sci. China Chem.* **64** 218
- [94] Reichmuth S K, Siefer G, Schachtner M, Mühleis M, Hohl-Ebinger J, Glunz S W 2020 *IEEE J. Photovoltaics* **10** 1076



## REVIEW

Research progress of perovskite-based triple-junction tandem solar cells<sup>\*</sup>

Xu Chang<sup>1)2)#</sup> Zheng De-Xu<sup>3)4)#</sup> Dong Xin-Rui<sup>1)</sup> Wu Sa-Jian<sup>3)</sup>  
 Wu Ming-Xing<sup>2)</sup> Wang Kai<sup>1)†</sup> Liu Sheng-Zhong<sup>1)4)‡</sup>

1) (*Key Laboratory of Photoelectric Conversion and Utilization of Solar Energy, Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China*)

2) (*Thin-film Solar Cell Materials and Devices Engineering Research Center of Hebei Province, Hebei Province Key Laboratory of Inorganic Nanomaterials, College of Chemistry and Material Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China*)

3) (*China National Nuclear Power Co., Ltd., Beijing 100089, China*)

4) (*China National Nuclear Power Optoelectronics Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201306, China*)

( Received 26 August 2024; revised manuscript received 30 October 2024 )

## Abstract

The energy conversion efficiency of single-junction solar cells is limited by the Shockley-Queisser theory and the most effective strategy to break through this limit is to fabricate multi-junction tandem solar cells. Perovskite materials provide a continuously tunable energy band structure, offering a new option for light-absorbing materials in multi-junction tandem cells. In the field of perovskite-based multi-junction tandem solar cells, triple-junction tandem solar cells have demonstrated great potential. The present paper introduces the configuration of triple-junction solar cells and its facing three scientific challenges. 1) Ensuring energy level alignment among sub-cells is a critical concern for three-junction batteries. Specifically, the top wide-band gap sub-cell must possess a band gap ranging from 1.8 to 2.2 eV; however, current perovskite material systems with wide-band gaps exhibit certain defects. 2) It is essential to achieve current matching in multi-junction tandem solar cells while optimizing the absorption layer and minimizing parasitic absorption in order to maximize the current output of solar cells. 3) The functional layers of multi-junction tandem solar cells are stacked sequentially using different deposition methods, which imposes higher compatibility requirements on the intermediate interconnect layers. Subsequently, the research progress of perovskite-based triple-junction tandem solar cells is introduced, including perovskite/perovskite/silicon tandem solar cells, perovskite/perovskite/organic tandem solar cells, and all-perovskite tandem solar cells. Their respective highest efficiencies are 19.4%, 23.87%, and 27.1%. Finally, this paper explores the research directions for further improving the performance of triple-junction solar cells. In addition to improving energy conversion efficiency, perovskite-based solar cells must also solve the stability problems in order to achieve future commercialization, and provide guidance for the development of efficient triple-junction cells.

**Keywords:** tandem, solar cells, wide-band gap perovskite, photoinduced phase separation

**PACS:** 88.40.jp, 88.40.H-, 88.40.-j, 84.60.Jt

**DOI:** 10.7498/aps.73.20241187

**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241187

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFE0138100) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 22279140, U20A20252, 52350710208, U21A20102, 62174103).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: wangkai@dicp.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: szliu@dicp.ac.cn

## 钙钛矿基三结叠层太阳电池的研究进展

许畅 郑德旭 董心睿 吴飒建 武明星 王开 刘生忠

### Research progress of perovskite-based triple-junction tandem solar cells

Xu Chang Zheng De-Xu Dong Xin-Rui Wu Sa-Jian Wu Ming-Xing Wang Kai Liu Sheng-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 248802 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241187

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241187>

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

#### 宽带隙钙钛矿材料及太阳电池的研究进展

Research progress of wide bandgap perovskite materials and solar cells

物理学报. 2020, 69(20): 207401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200822>

#### 迈向效率大于30%的钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池技术的研究进展

Research progress of perovskite/crystalline silicon tandem solar cells with efficiency of over 30%

物理学报. 2023, 72(5): 058801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222019>

#### 钙钛矿/硅异质结叠层太阳电池: 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>

#### 丙胺盐酸盐辅助结合气淬法制备高效宽带隙钙钛矿太阳电池

Preparation of wide-bandgap perovskite thin films by propylamine hydrochloride assisted gas quenching method

物理学报. 2024, 73(15): 158401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240561>

#### 钙钛矿太阳电池中的缓冲层研究进展

Progress in perovskite solar cells based on different buffer layer materials

物理学报. 2020, 69(13): 138401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200543>

#### 铯掺杂提升反梯度结构二维(CMA)<sub>2</sub>MA<sub>8</sub>Pb<sub>9</sub>I<sub>28</sub>钙钛矿薄膜及太阳电池的性能

Cesium doping for improving performance of inverse-graded 2D (CMA)<sub>2</sub>MA<sub>8</sub>Pb<sub>9</sub>I<sub>28</sub> perovskite film and solar cells

物理学报. 2023, 72(13): 138801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230357>