



世界纪录效率的全钙钛矿叠层太阳电池: 3D/3D异质结助力效率提升

李亮

苏州大学物理科学与技术学院, 苏州 215006

E-mail: lli@suda.edu.cn

World record of all-perovskite tandem solar cells: 3D/3D heterojunctions boost efficiency improvement

Liang Li

School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China

E-mail: lli@suda.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2023-0579](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0579)

钙钛矿材料具有光吸收系数高、载流子迁移率大、带隙可调节、合成方法简单、成本低廉等优点, 被认为是最具前景的下一代光伏材料之一。将具有不同带隙的钙钛矿材料使用隧穿复合结进行连接, 可以构建全钙钛矿叠层器件, 从而实现对太阳光谱的分段利用, 以降低载流子热化损失, 提高理论效率上限。全钙钛矿叠层器件的认证效率已达到26.4%^[1], 超过了最优的单结钙钛矿器件(25.7%)^[2]。宽带隙钙钛矿顶电池、窄带隙钙钛矿底电池和隧穿结是构建全钙钛矿叠层电池的3个核心部分。窄带隙钙钛矿子电池中较低的开路电压和填充因子制约了叠层电池效率的进一步提升^[3,4]。

近期, 南京大学谭海仁团队在全钙钛矿叠层电池领域取得最新进展, 经日本电气安全和环境技术实验室(Japan Electrical Safety and Environment Technology Laboratories, JET)国际权威认证的叠层器件效率超过28.0%, 首次超越了传统晶硅电池, 该结果被收录到最新一期*Solar Cell Efficiency Tables* (Version 61)。该团队通过热蒸发沉积及溶液法在铅锡窄带隙钙钛矿顶部沉积了纯铅基宽带隙钙钛矿, 构建了具有Type-II型能带排列的3D/3D异质结结构。异质结减少了钙钛矿与电子传输层的接触损失, 有效屏蔽了表面高密度缺陷层对铅锡窄带隙钙钛矿太阳能电池性能的影响, 进一步地提升了全钙钛矿叠层器件的性能。相关成果发表于*Nature*^[5]。

2D/3D异质结结构是降低钙钛矿电池界面复合损失的一

种常见策略。然而, 溶液法表面后处理得到的2D钙钛矿均匀性较差(层数 n 值难以控制)且导电性较低, 不利于载流子的界面输运和抽取, 限制了器件的光伏性能。该团队首先利用热蒸发沉积和溶液法, 在铅锡窄带隙钙钛矿薄膜上沉积了一层数十纳米厚的三维纯铅宽带隙钙钛矿薄膜(图1(a))。飞行时间二次离子质谱图显示, 钙钛矿表面的铅信号远高于钙钛矿体相, 证实了表面异质结结构的形成(图1(b))。紫外光电子能谱显示, 宽带隙钙钛矿与铅锡窄带隙钙钛矿形成了Type-II型的能带排列(图1(c))。这将有利于促进电子从钙钛矿吸光层向电子传输层的转移、降低钙钛矿/电子传输层之间的界面复合损失。最佳性能的铅锡窄带隙钙钛矿电池的效率达到了23.8%, 为目前报道的最高效率(图1(d))。将异质结窄带隙子电池与高效宽带隙子电池进行结合构筑了全钙钛矿叠层太阳能电池(图1(e))。异质结结构有效地提升了全钙钛矿叠层电池的开路电压、填充因子及效率。实验室自测效率从26.7%提高到28.5%(图1(f))。

总之, 该工作针对溶液法构造2D钙钛矿方法的优势和短板, 创新地提出了使用热蒸发沉积与溶液法结合的方法在铅锡窄带隙钙钛矿上沉积了一层3D宽带隙钙钛矿, 实现了窄带隙子电池性能的提升, 促进了叠层器件性能的发展。一方面, 这项工作加深了领域内对光伏器件结构设计的理解和认识; 另一方面, 这项工作实现了超高效率的全钙钛矿叠层太阳能电池, 进一步推进了钙钛矿光伏器件的产业化进程。

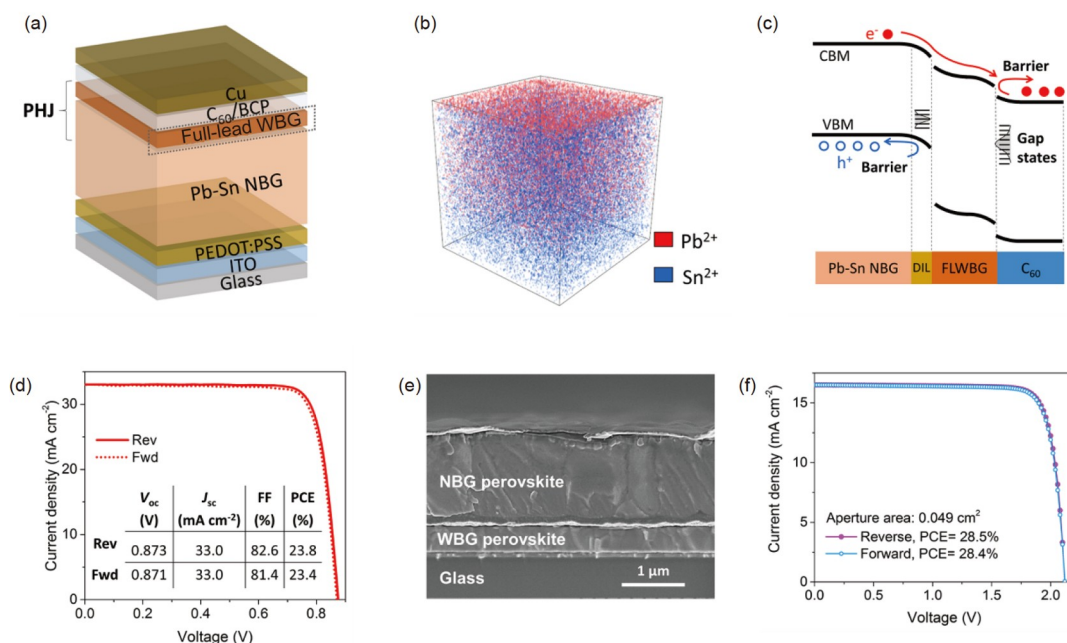


图 1 (网络版彩色)异质结构窄带隙钙钛矿与叠层器件的结构与性能^[5]. (a) 含有3D/3D双层钙钛矿异质结的窄带隙钙钛矿电池器件结构. (b) 异质结构钙钛矿薄膜的飞行时间二次离子质谱图. (c) 能带弯曲后的异质结构铅锡钙钛矿太阳能电池的能级图; 两条线分别表示非辐射复合路径和载流子漂移方向. (d) 最佳性能异质结构铅锡窄带隙钙钛矿电池的 $J-V$ 曲线. (e) 全钙钛矿叠层太阳能电池扫描电子显微镜截面图. (f) 最佳性能的异质结构全钙钛矿叠层电池的 $J-V$ 曲线

Figure 1 (Color online) Structure and performance of the narrow bandgap perovskite and tandem device with heterojunction structures^[5]. (a) Narrow bandgap perovskite solar cell device structure with 3D/3D double layer perovskite heterojunctions. (b) Time-of-flight secondary ion mass spectrometry of heterostructure perovskite films. (c) Energy level diagram of a heterojunction Pb-Sn perovskite solar cell after band bending. Two lines indicate the non-radiative composite path and carrier drift direction, respectively. (d) $J-V$ curve of the champion Pb-Sn narrow bandgap perovskite solar cell with heterojunction structures. (e) Cross-section scanning electron microscope of the all-perovskite tandem solar cell. (f) $J-V$ curve of the champion heterojunction all-perovskite tandem solar cell

参考文献

- Lin R, Xu J, Wei M, et al. All-perovskite tandem solar cells with improved grain surface passivation. *Nature*, 2022, 603: 73–78
- Park J, Kim J, Yun H S, et al. Controlled growth of perovskite layers with volatile alkylammonium chlorides. *Nature*, 2023, 616: 724–730
- Jiang Q, Tong J, Scheidt R A, et al. Compositional texture engineering for highly stable wide-bandgap perovskite solar cells. *Science*, 2022, 378: 1295–1300
- Chen H, Maxwell A, Li C, et al. Regulating surface potential maximizes voltage in all-perovskite tandems. *Nature*, 2023, 613: 676–681
- Lin R, Wang Y, Lu Q, et al. All-perovskite tandem solar cells with 3D/3D bilayer perovskite heterojunction. *Nature*, 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06278-z