



应用于钙钛矿太阳能电池中金属氧化物电子传输材料的研究进展

朱立华, 商雪妮, 雷凯翔, 郑士建, 戴其林, 陈聪, 宋宏伟

引用本文:

朱立华, 商雪妮, 雷凯翔, 等. 应用于钙钛矿太阳能电池中金属氧化物电子传输材料的研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(5): 481–497.

ZHU Li-hua, SHANG Xue-ni, LEI Kai-xiang, et al. Research Progress of Metal Oxide Electron Transporting Materials Applied in Perovskite Solar Cells[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(5): 481–497.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204105.0481>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米ZnO墨水的溶剂及浓度优化及其在钙钛矿太阳能电池中的应用

Solvent and Concentration Optimization of Nano-ZnO Inks and Their Application in Perovskite Solar Cells

发光学报. 2016, 37(3): 265–273 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163703.0265>

表面等离子激元与F-P共振耦合平衡钙钛矿太阳能电池有源层内载流子产生速率

Surface Plasmon Polaritons and F-P Resonance Coupled Modes Balance The Generation Rate of Charge Carriers of Perovskite Solar Cells

发光学报. 2018, 39(12): 1749–1756 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183912.1749>

利用吡啶添加剂提高钙钛矿太阳能电池的光伏性能

Improvement of The Performance of Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells by Using Pyridine as Additive

发光学报. 2017, 38(11): 1503–1509 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173811.1503>

利用PNA添加剂来调控钙钛矿薄膜结晶和覆盖率实现高效太阳能电池

Tuning The Crystal-growth and Coverage of Perovskite Thin-films for Highly Efficient Solar Cells by Using Polyacrylonitrile Additive

发光学报. 2017, 38(7): 897–904 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173807.0897>

在电子传输层中添加PVK提高钙钛矿太阳能电池的性能

Improving The Performance of Inverted Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells via Poly(n-vinylcarbazole) as Additive in Electron Transporting Layer

发光学报. 2017, 38(9): 1210–1216 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173809.1210>

文章编号: 1000-7032(2020)05-0481-17

应用于钙钛矿太阳能电池中 金属氧化物电子传输材料的研究进展

朱立华¹, 商雪妮¹, 雷凯翔¹, 郑士建¹, 戴其林², 陈 聪^{1*}, 宋宏伟^{3*}

(1. 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300130;

2. Department of Chemistry, Physics and Atmospheric Sciences, Jackson State University, Jackson, Mississippi, MS 39217, USA;

3. 吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 基于有机金属卤化铅钙钛矿材料作为光活性层的太阳能电池(PSCs)已经获得了25.2%的认证效率,是除硅基太阳能电池外被认为最有可能实现商业化的太阳能电池之一。电子传输层是PSCs器件结构的最基本组成之一,其构成材料与光活性层的成膜质量、界面电荷的快速提取以及能级匹配等密切相关。因而,电子传输材料在PSCs的光伏性能及稳定性调控方面发挥着重要作用。本文对应用在PSCs中的金属氧化物电子传输材料进行了回顾与总结,着重强调了材料的纳米结构与制备工艺、半导体特性与分类以及掺杂与界面修饰等方面的研究进展,并对其今后的发展进行了展望。

关键词: 钙钛矿太阳能电池; 金属氧化物电子传输材料; 掺杂; 界面修饰

中图分类号: TM914.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20204105.0481

Research Progress of Metal Oxide Electron Transporting Materials Applied in Perovskite Solar Cells

ZHU Li-hua¹, SHANG Xue-ni¹, LEI Kai-xiang¹, ZHENG Shi-jian¹,DAI Qi-lin², CHEN Cong^{1*}, SONG Hong-wei^{3*}

(1. School of Material Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Department of Chemistry, Physics and Atmospheric Sciences, Jackson State University, Jackson, Mississippi, MS 39217, USA;

3. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding Authors, E-mail: chencong@hebut.edu.cn; songhw@jlu.edu.cn

Abstract: Perovskite solar cells (PSCs) based on organic metal halide perovskite materials as photoactive layer have been obtained a certified power conversion efficiency of 25.2% and are considered to be one of the most commercially viable solar cells. In the device structure of PSCs, the electron transporting layer is one of the most basic components. The selection of the electron transporting materials is closely related to the film quality of the photoactive layer, the rapid extraction of interface charge and the matching of bandgaps. Therefore, the electron transporting materials play an important role in the regulating the photovoltaic performance and stability of PSCs. This paper reviews and summarizes the research progress of metal oxide electron transporting materials applied in PSCs, emphasizes the nanostructure and preparation process, photoelectric characteristics and classification, doping and surface modification of metal oxide electron transport materials, and looks forward to its future development.

收稿日期: 2020-03-01; 修订日期: 2020-04-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0207101); 国家自然科学基金(51771201)资助项目

Supported by National Key Research and Development Program(2016YFC0207101); National Natural Science Foundation of China(51771201)

Key words: perovskite solar cells; metal oxide electron transporting materials; doping; interface modification

1 引 言

在现有的可再生能源中,开发太阳能来缓解能源与环境危机是一个十分可行的方案。钙钛矿吸光材料因其具有高光吸收系数、高载流子迁移率、高载流子寿命、宽吸收光谱范围、低激子束缚能、可调控带隙、可多种方式制备、成本低廉等优点,引起了全世界研究学者的关注^[1]。2009年,有机金属卤化铅 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 首次被用作染料敏化太阳能(PSCs)电池的敏化剂,其功率转换效率(PCE)仅为3.8%^[2];此后,迎来了以钙钛矿作为吸光材料的太阳能电池研究热潮。截至目前,PSCs已经获得25.2%的认证效率^[3]。从太阳能电池发展效率图可知,PSCs发展速度远超过第一代硅基太阳能电池和第二代薄膜太阳能电池,成为了第三代太阳能电池的典型代表^[3]。PSCs因高效率、制作成本低廉被认为是除硅基太阳能电池以外,最有可能实现商业化的太阳能电池之一。

电子传输层是PSCs结构的基本组成之一,对PSCs的性能和稳定性起着重要的作用。其重要性主要表现在以下几方面:(1)电子传输层的选取与钙钛矿薄膜的结晶性有着极为密切的关系;(2)电子传输层起着光生载流子的提取与运输的作用;(3)电子传输层与钙钛矿光活性层和电极之间的界面对载流子运输动力学具有重要影响;(4)电子传输层在器件封装、光谱调控、界面化学反应等方面对PSCs的性能会产生重要影响。

到目前为止,电子传输材料主要分为两大类:金属氧化物与有机物。有机电子传输材料因易在钙钛矿前驱体溶剂(DMF和DMSO等)中溶解,使得制备工艺和器件性能严重受限。此外,基于富勒烯有机电子传输材料的光和热稳定性也相对较差^[4]。与有机分子电子传输材料相比,金属氧化物具有高电子迁移率、透光性好、纳米结构多样、制备工艺简单以及可以作为骨架层来改善钙钛矿层成膜质量等优点,是PSCs中最常用的电子传输材料。如最为典型的金属氧化物电子传输材料 TiO_2 、 ZnO 、 SnO_2 等,以它们作为电子传输层的PSCs都能够展现出超过20%的PCE。Tavakoli等^[5]用非晶态的 SnO_2 修饰 TiO_2 层得到双层电子传输层,使其能级结构与钙钛矿光活性层更加匹

配,有效地提高了电荷注入效率,最终获得了PCE为21.4%且无迟滞现象的PSCs。2019年,Rehman等^[6]设计了一种新的在低温溶液加工下合成的氢氧化钡修饰的硼掺杂 ZnO 电子传输层,该电子传输层表面的缺陷密度显著减少,最后得到PCE为20.62%的高稳定且无迟滞现象的PSCs。2020年,南开大学张晓丹课题组^[7]在低温下合成了 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ 复合电子传输层来优化PSCs的能级结构,研究表明该复合电子传输层与钙钛矿光活性层形成了梯度能级校准,进而使界面电荷的分离与运输效率显著提高,最终器件获得了23.24%的PCE。

在以往的研究中,研究者已经对单一金属氧化物电子传输材料进行了总结,如2018年,Luo等^[8]综述了近年来 ZnO 纳米结构在PSCs中的应用进展以及面临的机遇和挑战。2019年,Zhen等^[9]详细综述了近年来通过控制 TiO_2 形貌、表面修饰、掺杂和构建复合材料等方法来提高PSCs的整体性能的研究工作。2019年,Chen等^[10]介绍了 SnO_2 制备工艺以及 SnO_2 纳米结构对PSCs性能的影响,总结了基于 SnO_2 电子传输层对提高器件PCE和长期稳定性的不同方法。目前,亟需对整个金属氧化物电子传输材料家族进行分析与总结,尤其是近几年广泛应用的 SrTiO_3 、 Zn_2SnO_4 等三元金属氧化物材料的综述鲜有报道。更为重要的是,金属氧化物的掺杂、金属氧化物/无机半导体结构、金属氧化物/有机材料复合结构等方面的研究也引起了科研领域极大的兴趣,这些都是进一步提升PSCs光伏性能的重要发展方向。本文结合PSCs研究历程中金属氧化物电子传输材料的发展规律以及材料的组分和结构的改良性策略,对其进行了详细的介绍与总结。

2 制备工艺

电子传输材料的制备工艺决定着电子传输层的成膜质量,如薄膜的结晶性、有无针孔和裂纹、纳米结构和厚度等。电子传输层的制备工艺从大方向主要分为:物理制备工艺和化学制备工艺。

2.1 物理制备工艺

电子传输层的物理制备工艺主要是物理气相沉积法,即使用物理方法(如热蒸发、离子束或电

子束轰击等)使蒸镀物质气化,气化原子在冷却条件下沉积在基底上生成薄膜的过程。主要包括:电子束蒸发法、原子层沉积法、磁控溅射法、脉冲激光沉积法等。Ma等^[11]在低温条件下利用电子束蒸发法实现了规模化、低成本的SnO₂电子传输层的制备,器件的PCE达到18.2%,储存34 d后仍维持97%的初始性能,证明了基于电子束蒸发法制备的SnO₂基PSCs商业化潜力巨大。Chen等^[12]用原子层沉积技术在150℃低温下制备了TiO₂电子传输层,进一步研究发现相比于溶液法合成的TiO₂,原子层沉积的TiO₂能够提高PSCs的光稳定性和可重复性,最终获得19.45%的PCE。我们课题组^[13]最早在2015年就利用了射频磁控溅射法制备TiO₂电子传输层,通过沉积时间来精确控制薄膜的厚度,结果表明当溅射时间为30 min(60 nm)时,PSCs能够获得12.1%的PCE,器件在放置1 440 h后,其效率仍能够维持初始性能的77%;在此基础上,我们又用磁控溅射法制备了40 mm×40 mm的大面积器件和PCE为8.9%的柔性器件。综上可知,物理制备工艺具有成膜质量高、厚度精确可控、可规模化生产等优点,但对设备的要求比较高。

2.2 化学制备工艺

化学制备工艺主要有化学浴沉积法、水热合成法、溶胶凝胶法、前驱体溶液旋涂法和喷涂法等。Ryu等^[14]研究了化学浴沉积TiO₂致密层的水解时间对观结构PSCs的性能影响,结果表明

当TiCl₄前驱体溶液水解时间为70 min时,器件能够表现出11.53%的最高PCE。Liu等^[15]通过水热合成法在低温下制备了无配体且高度结晶的SnO₂电子传输层,研究发现水热处理可以去除SnO₂颗粒表面有机活性剂,并促进结晶形成高质量的SnO₂电子传输层,最终器件获得17.3%的PCE。Yang等^[16]用旋涂法成功制备了无迟滞现象的SnO₂基平面结构PSCs,PCE达到21.52%。化学制备工艺具有成本低廉、易操作、反应活性高等优点,是实验室制备薄膜的主要方法。但是,该方法不适合大面积器件的制备,且制备的电子传输层薄膜的均匀性有待提高。

3 材料的种类及特性

金属氧化物电子传输材料因可调节带隙、透光性好、优异的光生载流子注入和输运性能作为PSCs电子传输层得到了广泛研究。常见的金属氧化物电子传输材料有TiO₂、ZnO、SnO₂、SrTiO₃、Zn₂SnO₄等,按照金属元素个数的不同,分为二元金属氧化物和三元金属氧化物。作为高效电子传输材料的前提条件是具有优异的光电性能同时还要与钙钛矿光活性材料具有良好的能级匹配关系,本文对其进行了总结。图1是金属氧化物电子传输材料与透明导电基底氟掺杂氧化锡(FTO)和甲基胺碘化铅(MAPbI₃)的能级匹配图,表1是典型金属氧化物的光电性能及优缺点对比表。

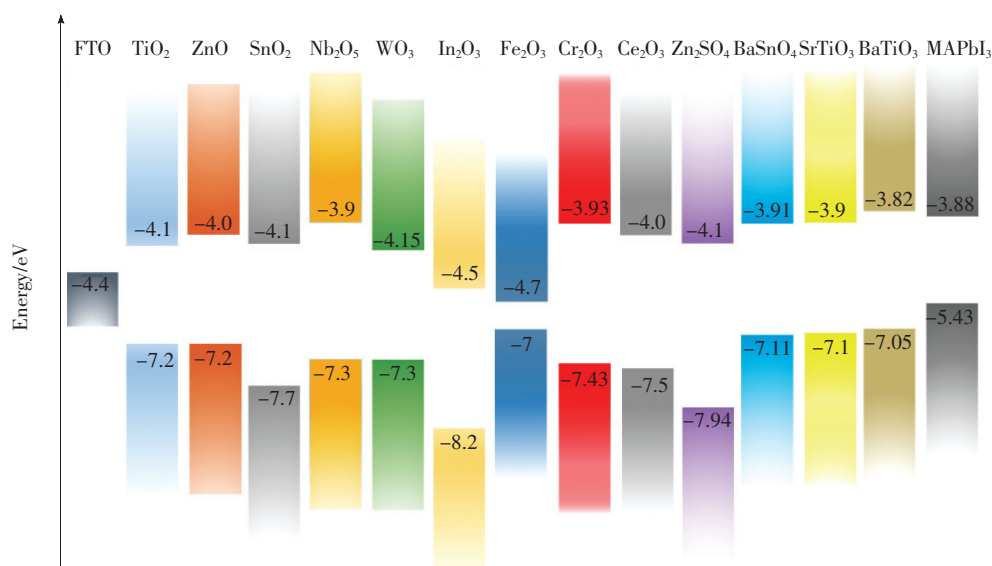


图1 典型金属氧化物与FTO和甲基胺碘化铅(MAPbI₃)能级图

Fig. 1 Typical metal oxides with FTO and lead methyl aminoiodide(MAPbI₃) energy levels

表 1 典型金属氧化物光电性能及优缺点对比

Tab. 1 Comparison of photoelectric performance, advantages and disadvantages of typical metal oxides

晶体结构	禁带宽度/ eV	表面功函数/ eV	电子迁移率/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	折射 指数	电子有效质量 (m^*)	介电 常数	优点	缺点
金红石 TiO_2 锐钛矿 板钛矿	3.0~3.2	4.5~5.0	0.1~4	2.5	9	170	化学稳定性好;离子掺杂改性兼容性好	制备过程一般需 500 °C 高温退火;电子迁移率低;在紫外光下照射易分解
ZnO 闪锌矿	3.2~3.3	4.45~5.3	205~300	2.0	0.26	8.5	电子迁移率最高;可低温制备;纳米结构种类丰富	表面存在有机官能团使沉积其上的钙钛矿光吸收层发生分解
SnO_2 金红石 纤锌矿	3.5~4.0	4.71~5.33	240	2.0	0.3	9.6	透光性最好;可低温制备;良好的光稳定性和化学稳定性	表面固有缺陷多,使器件电流-电压的迟滞现象严重

3.1 二元金属氧化物电子传输材料

3.1.1 TiO_2

TiO_2 是 PSCs 中最典型的电子传输材料之一,它是一种稳定、无毒的氧化物,折射指数为 2.5,禁带宽度为 3.0~3.2 eV,为直接带隙 n 型半导体材料^[17]。 TiO_2 有三种同质异型体:金红石、锐钛矿和板钛矿。锐钛矿相的 TiO_2 因具有较高的导电性,在光伏器件领域应用最广泛。但锐钛矿相是热力学不稳定相,在 750 °C 下会发生不可逆反应转变成金红石相。因其制备需要 500 °C 高

温烧结,这限制了锐钛矿相 TiO_2 在柔性 PSCs 中的应用^[18]。与锐钛矿相相比,金红石相是热力学稳定相,可通过低温方法合成。而板钛矿是一种不稳定的中间相,在光伏器件领域中鲜有报道^[18]。Miyasaka 等^[2]首次将商业化 TiO_2 纳米晶作为介孔电子传输层,用来提取和运输电荷,实现了 3.8% 的 PCE。此后,利用 TiO_2 作为电子传输层在 PSCs 中的应用被广泛研究。目前, TiO_2 纳米线、纳米管和纳米棒等纳米结构(图 2)已经有大量研究报道^[19-21]。如 Yang 等^[22]在 100 °C 下制

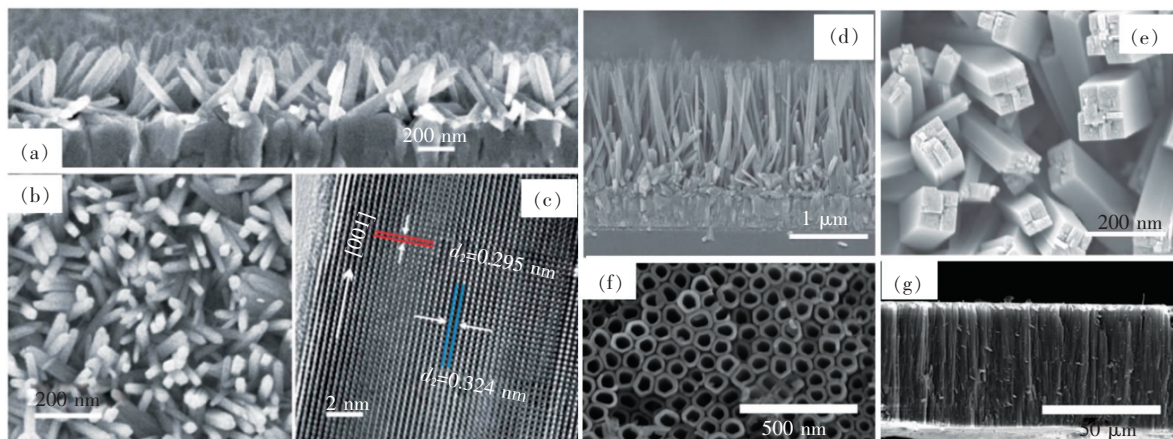


图 2 TiO_2 纳米结构。(a) TiO_2 纳米棒 SEM 截面图;(b) TiO_2 纳米棒 SEM 截面图;(c) TiO_2 纳米棒 TEM 图^[20];(d) TiO_2 纳米线的 SEM 截面图;(e) TiO_2 纳米线 SEM 俯视图^[19];(f) TiO_2 纳米管 SEM 俯视图;(g) TiO_2 纳米管 SEM 截面图^[21]。

Fig. 2 TiO_2 nanostructure. (a) SEM cross-section of TiO_2 nanorods. (b) Top view of TiO_2 nanorods SEM cross section. (c) TEM image of TiO_2 nanorods^[20]. (d) SEM cross section of TiO_2 nanowire. (e) Top view of TiO_2 nanowire SEM^[19]. (f) Top view of TiO_2 nanotubes SEM. (g) SEM cross section of TiO_2 nanotubes^[21].

备了定向生长 TiO_2 纳米棒阵列, 沉积在其上的钙钛矿薄膜具有更大的晶粒和结晶质量, 提高了光生载流子在钙钛矿/ TiO_2 界面的注入效率, 减少了载流子复合, 使 PSCs 的 PCE 达到 19.33%。近年来, 针对 TiO_2 的制备过程需高温退火、电子迁移率低、在紫外光照射下分解等问题已经有科研工作者提出了解决方案。如 Yella 等^[23]用化学浴沉积法在 70 °C 低温下制备了 PCE 为 13.7% 的器件; 通过 Li^+ 的掺杂来提高 TiO_2 导电性^[24]、利用发光转化材料 $\text{Eu}(\text{TBA})_2(\text{Phen})\text{MAA}(\text{ETPM})$ 修饰 TiO_2 来提高其抗紫外光性^[25]等。不可否认, TiO_2 目前仍是极具竞争力的电子传输材料。

3.1.2 ZnO

ZnO 是另外一种常见的 n 型半导体材料, 在电子、光电探测器、发光二极管等半导体器件中有着广泛的应用^[26]。尽管 ZnO 与 TiO_2 有着相似的能带结构, 但 ZnO 具有载流子迁移率更高、透光性更好、激子束缚能更大以及可低温制备和大面

积成膜等优点, 作为电子传输材料广泛应用于柔性 PSCs 中^[27]。 ZnO 常见的纳米结构如图 3(a) ~ (d) 所示^[28-31]。Kumar 等^[32]在低温条件下制备了 ZnO 薄膜, 并将其首次作为致密层与介孔层应用在钙钛矿固态太阳能电池中, 得到刚性器件 PCE 为 8.9%, 柔性器件为 2.62%。随后, Zheng 等^[33]用燃烧法制备了 ZnO 电子传输层, 该方法克服了传统溶胶凝胶法制备 ZnO 的缺陷, 得到结晶度高、表面形貌好、与钙钛矿层相适合的能级结构和化学相容的电子传输层, 无需对 ZnO 进行掺杂和表面修饰就实现了近 20% 的 PCE。目前为止, ZnO 作为电子传输层制备的高效 PSCs 已有大量报道^[6,34], 研究者针对 ZnO 与钙钛矿层之间存在的不稳定问题也提出了多种解决办法, 如引用缓冲层^[35]、紫外线和硝酸处理^[36]、寻找热稳定好的钙钛矿吸光材料^[37]等。在柔性 PSCs 中, ZnO 被认为是取代 TiO_2 金属氧化物电子传输材料的最优选择。

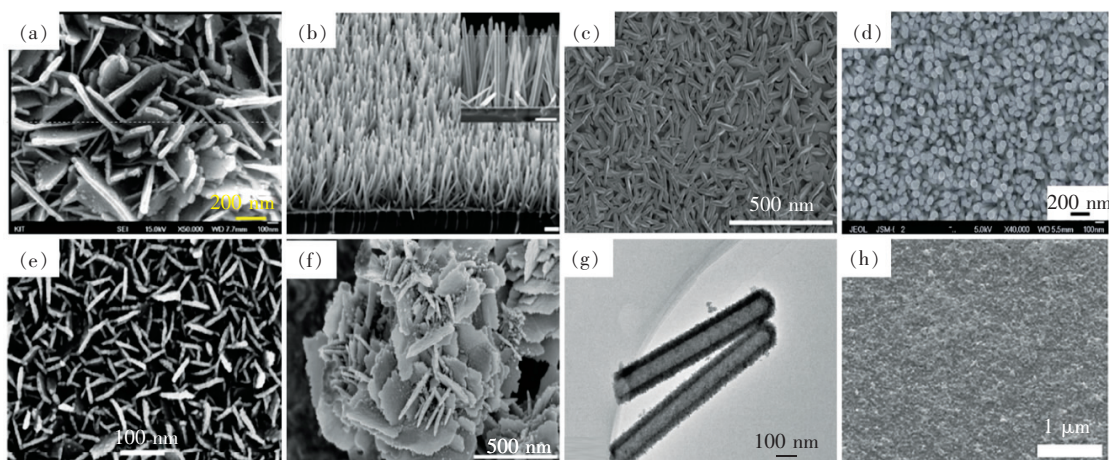


图 3 ZnO 纳米结构 SEM。(a) 纳米片^[28]; (b) 纳米线^[29]; (c) 纳米芯片^[30]; (d) 纳米棒, SnO_2 纳米结构图^[31]; (e) Y 掺杂纳米片 SEM 图^[38]; (f) 电喷涂法制备纳米片 SEM 图^[39]; (g) 纳米管 TEM 图^[40]; (h) 纳米粒子^[41]。

Fig. 3 ZnO nano-structure SEM. (a) Nanosheet^[28]. (b) Nanowires^[29]. (c) Nanoscale chips^[29]. (d) Nanorod. SnO_2 nano-structures^[31]. (e) Y-doped nanosheet^[38]. (f) Preparation of nanosheets by electric spraying^[39]. (g) TEM images of nanotubes^[40]. (h) Nanoparticles^[41].

3.1.3 SnO_2

SnO_2 是一种宽禁带、高透光、高电子迁移率、高化学稳定性的 n 型半导体材料。与 TiO_2 相比, SnO_2 不仅禁带宽度更宽、在紫外光照射下吸收的紫外光较少, 而且 SnO_2 表面具有很好的化学稳定性。除此之外, SnO_2 具有优异的电子迁移率、良好的透光性以及可低温制备的特点, 因此 SnO_2 被认为是很有前景的代替 TiO_2 电子传输材料。与

ZnO 相比, SnO_2 透光性更好, 其表面没有羟基和醋酸酯配体等官能团, 沉积在其上的钙钛矿层在 100 °C 能够稳定存在, 不会发生去质子化等反应, 因此可用于制备具有长期稳定性的 PSCs^[42]。图 3(e) ~ (h) 是 SnO_2 常见的一些纳米结构^[38-41]。Zhu 等^[43]用水热合成法制备了纳米棒介孔单晶, 首次证明了其在 PSCs 中应用的可行性; 在此基础上, 该团队用 TiCl_4 修饰 SnO_2 介孔单晶后, 能够

将 PCE 提高到 8.54%, 进一步证明了其作为电子传输层在 PSCs 中应用的巨大潜力。目前, SnO_2 基 PSCs 超过 20% 的 PCE 已有大量报道^[16,44-46]。 SnO_2 基 PSCs 除了效率高以外, 其稳定性也取得了很好的发展, 如 Wang 课题组^[47]首次利用水热合成法将碳点通过溶解过程引入到 SnO_2 电子传输层中, 碳点的引入显著降低了 SnO_2 薄膜的陷阱态密度, 提高了其迁移率, 最后器件获得了 19.83% 的 PCE; 将制备的器件放在干燥环境中 1 200 h 后, 仍然能够保持 90% 以上的初始性能, 在紫外光照射下同样也表现出优异的稳定性。综合对比分析可知, SnO_2 有可能是最先实现商业化大规模生产的半导体氧化物电子传输材料。

3.1.4 Nb_2O_5

Nb_2O_5 的带隙为 3.4 eV, 具有高导带、良好透光性和光稳定性, 近几年在 PSCs 中也得到广泛研究。 Nb_2O_5 最为常见的纳米结构如图 4(a) 所示。Feng 等^[48]用电子束蒸发法制备了 Nb_2O_5 薄膜, 在未经任何处理的情况下就实现了 18.59% 的 PCE; 此外, 该课题组在此基础上又对不同有效面积的 Nb_2O_5 基刚性和柔性器件进行了探讨, 发现大面积的刚性器件和柔性器件都具有低迟滞效应。Wang 等^[49]在低温下制备了 Nb_2O_5 纳米粒子并将其作为电子传输层, 获得了 20.22% 的 PCE 和 1.19 V 的开路电压, 将该器件在未封装的情况下置于紫外光下照射 10 d 后, 短路电流仍维持初始值的 93%, 相同条件下 TiO_2 基器件短路电流只

有初始性能的 40%, 表明 Nb_2O_5 基器件有良好的抗紫外光稳定性。由此可知, n 型 Nb_2O_5 半导体因优异的光电性能和良好的光稳定性也是 PSCs 中理想电子传输材料之一。

3.1.5 WO_3

三氧化钨 (WO_3) 电子迁移率为 $10 \sim 20 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 禁带宽度为 2.7 ~ 3.9 eV^[50]。与 TiO_2 相比, 其抗酸腐蚀性能更好。但是, 其在潮湿环境中更为敏感, 因而会导致器件的性能迅速下降^[51]。 WO_3 半导体的可印刷性、能够大面积制备是其作为电子传输材料的主要优势。Gheno 等^[51]在 100 °C 下, 使用喷墨打印制备 WO_3 并将其应用于 PSCs 中, 获得了 9.5% 的 PCE。Johansson 等^[52]在室温下用电子束蒸发法制备 WO_{3-x} 薄膜作为电子传输层(图 4(b)为 WO_{3-x} 基器件横截面图), 探讨了氧和钨不同化学计量比与薄膜厚度对器件性能的影响, 研究发现氧空位浓度越高, 其导电性越好, 光生载流子复合就越少^[50]。近年来, Ali 等^[50]通过电子束蒸发法在室温下制备了高度氧缺乏的 WO_{3-x} 薄膜作为电子传输层, 研究发现氧空位能够提高 WO_{3-x} 薄膜的导电性, 增加器件的开路电压以及降低器件的迟滞效应, 最后制备了 PCE 为 10.3% 的器件。

3.1.6 In_2O_3

氧化铟 (In_2O_3) 是一种很有前途的 n 型半导体材料, 不仅有宽的能带隙 (3.75 eV), 而且还具有良好的电子迁移率 ($20 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和热稳

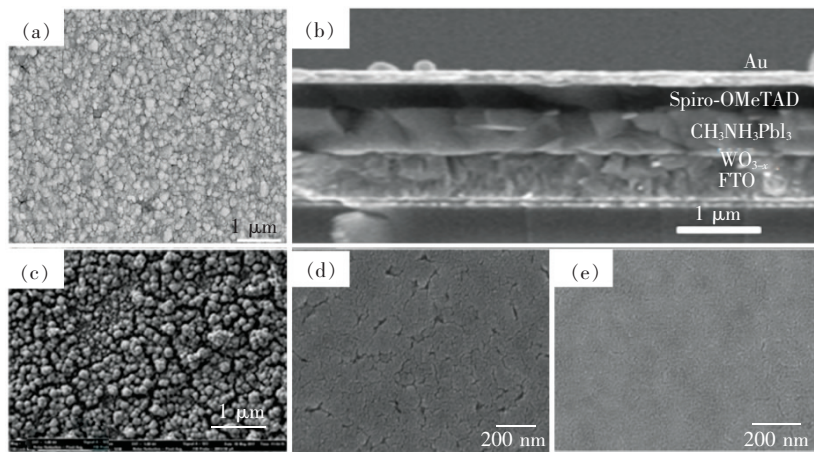


图 4 SEM 图。(a) Nb_2O_5 纳米粒子^[60]; (b) WO_{3-x} 基器件横截面图^[50]; (c) $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子^[58]; (d) In_2O_3 纳米粒子; (e) PCBM 修饰 In_2O_3 纳米粒子^[54]。

Fig. 4 Pictures of SEM. (a) Nb_2O_5 nanoparticles^[60]. (b) Cross section of WO_{3-x} -based devices^[50]. (c) $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles^[58]. (d) In_2O_3 nanoparticles. (e) In_2O_3 with PCBM modified nanoparticles^[54].

定性,其高度透光性也有利于其在光伏领域的应用^[53]。Qin等^[54]在低温下基于溶液加工法制备了 In_2O_3 纳米晶,如图4(d)~(e)所示,通过对 In_2O_3 前驱体溶液浓度和退火温度的优化,制备了PCE超过13%的器件;在此基础上,用PCBM来填充 In_2O_3 晶界的针孔或裂纹能够使器件的PCE进一步提高到14.83%。目前为止, In_2O_3 作为电子传输层的主要问题是覆盖率低以及存在离散分布的针孔,导致器件具有较低的填充因子和PCE。为解决这一问题,Chen等^[55]通过引入超薄的 TiO_x 薄膜对 In_2O_3 进行修饰,结果发现填充因子得到了明显的改善,最后制备的器件可实现16.38%的PCE。

3.1.7 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)因在大气环境中具有良好的稳定性,已经被应用在超级电容器和染料敏化太阳电池中^[56]。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 是氧化铁中最稳定热力学相,同时具有n型半导体性质。与 TiO_2 相比, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的导带能量更低($\approx 0.3\text{ eV}$),电子提取效率更快^[57]。此外, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 光催化活性低,因而具有很好的抗紫外光稳定性和长期稳定性。Bouhjar等^[58]制备了均匀、分布致密的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子作为电子传输层,如图4(c)所示。研究发现沉积其上的钙钛矿层具有更好的覆盖率,促进了界面电荷的分离与运输。Luo等^[59]用原位合成法生长了 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米岛作为电子传输层,与 TiO_2 介孔层相比, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 电子传输层具有更高透光率和电子提取能力、低的催化反应活性,器件实现了18.2%的高PCE和良好的光稳定性。

3.1.8 其他二元金属氧化物

Cr_2O_3 是一种储量丰富的n型半导体材料,其对光、大气、高温以及在水、醇、酸、碱等溶液条件下都具有极高的稳定性,作为PSCs的电子传输材料能够有效避免器件在制造过程中受到周围环境的负面影响。Dong等^[61]利用旋涂法首次制备了非晶的 Cr_2O_3 纳米片作为电子传输层并将其应用在PSCs中,实现了16.23%的PCE,充分证明了其作为电子传输材料在未来应用中的潜力。

CeO_x 是非常重要的稀土氧化物n型半导体材料,因可调节的宽带隙(3.0~3.6 eV)、大的介电常数、良好的热和化学稳定性等也被认为是很有潜力取代传统半导体氧化物的一种新型电子传

输材料^[62]。Wang等^[63]通过溶胶凝胶法首次合成了 CeO_x 电子传输层,仅通过对前驱体溶液浓度进行优化就可实现14.32%的PCE,在 CeO_x /钙钛矿层界面之间引用 PC_{61}BM 修饰层后,PCE可进一步提升到17.04%。2019年,Pandey等^[64]探讨了不同氧含量的 CeO_x 作为电子传输层对PSCs性能的影响。研究发现,当 $x=1.96$ 时,器件获得了16.5%的PCE,高于 $x=1.88$ 基器件;随后,进一步用PCBM进行修饰 CeO_x 后增加了器件的导电性,使器件的效率进一步上升到18.2%。

此外,北京大学朱瑞课题组^[65]利用 Cs_2CO_3 来修饰ITO并将其直接作为电子传输层。与传统的器件结构相比, Cs_2CO_3 能够简化器件结构与制备工序;更重要的是, Cs_2CO_3 的修饰还改善了ITO与钙钛矿层的能级匹配,最后获得了高效率的器件。

3.2 三元金属氧化物

三元金属氧化物(如 Zn_2SnO_4 、 BaSnO_3 和 SrTiO_3 ,纳米结构如图5所示)因其优异的光电性能(高电子迁移率、高透光性)作为电子传输材料,也是目前研究的热点之一。

3.2.1 Zn_2SnO_4

Zn_2SnO_4 的带隙为3.7 eV,电子迁移率为 $10\sim 15\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,电子有效质量为 $0.23m_e$,折射指数为1.37,表明其具有良好的电学性能和透光性^[66]。除此之外, Zn_2SnO_4 还具有良好的化学稳定性,能够在酸性、碱性和有机溶剂中稳定存在。Dou等^[67]开发了一种新的回流冷凝工艺来制备 Zn_2SnO_4 薄膜并将其应用在PSCs中, Zn_2SnO_4 能够显著提高器件内部的载流子提取与运输,最后器件获得了20.1%的PCE。

3.2.2 BaSnO_3

BaSnO_3 是一种具有钙钛矿结构的n型半导体,其带隙为3.2 eV。因其特殊的结构被用于各种光伏器件领域^[68]。研究表明, La^{3+} 掺杂的 BaSnO_3 在室温下的电子迁移率为 $320\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[69]。由于超高的电子迁移率和与钙钛矿层相似的晶体结构,利用 BaSnO_3 作为PSCs的电子传输层也被深入地探究。Shin等^[70]在低于 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下制备了 La^{3+} 掺杂的 BaSnO_3 超氧化物胶体,使PSCs的稳态PCE达到了21.2%,该器件在1000 h光照后仍能保持93%的初始PCE。

3.2.3 SrTiO₃

钙钛矿结构的 SrTiO₃ 是一种带隙与 TiO₂ 相似的 n 型半导体^[71]。将 SrTiO₃ 作为电子传输层的优势是它与钙钛矿吸光材料具有相似的晶体结构,有利于钙钛矿光活性材料成膜质量。Bera 等^[72]首次将 SrTiO₃ 作为电子传输材料应用于 PSCs 中,显著地

改善了钙钛矿层的结晶性与覆盖比。Neophytou 等^[73]在低温下制备了 SrTiO₃ 作为电子传输层,器件的 PCE 能够达到 19%;与其他低温处理的电子传输层相比,SrTiO₃ 减少了紫外和可见光范围内的寄生吸收,显著地提高了器件的稳定性,在 1 000 h 的恒定白光照射下仍保持 80% 的初始效率。

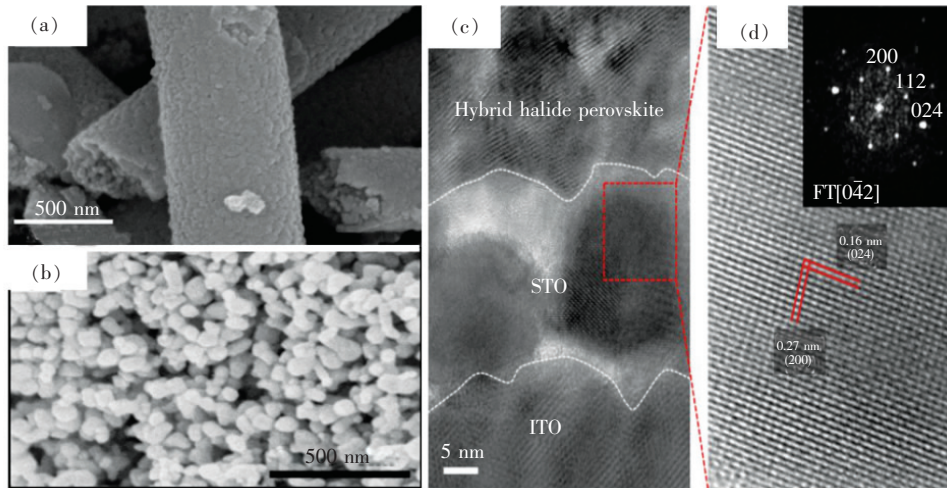


图 5 (a)Zn₂SnO₄ 多孔纳米纤维^[74]; (b)La-BaSnO₃ 纳米粒子 SEM 图^[75]; (c) ~ (d)SrTiO₃ 纳米粒子低倍 TEM 图和高倍 TEM 图^[73]。

Fig. 5 (a)SEM diagram of Zn₂SnO₄ porous nanofibers^[74]. (b)SEM diagram of La-BaSnO₃ nanoparticles^[75]. (c) - (d)TEM and high resolution TEM images of SrTiO₃ nanoparticles^[73].

3.2.4 BaTiO₃

BaTiO₃ 与 SrTiO₃ 具有相似的能带结构与晶体结构。其作为电子传输层应用在 PSCs 中也有报道,如 Okamoto 等^[76]设计了一种双层 BaTiO₃/TiO₂ 介孔层,来促进钙钛矿层的结晶和降低界面电荷复合,进而提高了器件的 PCE。

综上,尽管三元金属氧化物基 PSCs 的性能还低于二元金属氧化物基 PSCs,但三元金属氧化物因其特有的晶体结构(如钙钛矿结构 SrTiO₃、反尖晶石结构的 Zn₂SnO₄ 等)能够诱导钙钛矿层更快的结晶和更高的表面覆盖率,三元金属氧化物基 PSCs 也表现出良好的器件稳定性;此外,高透光性是它们的另一个优势。相信三元金属氧化物研究必能加快 PSCs 的商业化步伐。

4 金属氧化物的掺杂与界面修饰

4.1 掺杂

掺杂是改善半导体金属氧化物光电特性最常用、最为有效的手段之一。通过掺杂来调节金属

氧化物的带隙、透光性以及导电性并进一步提高 PSCs 性能的方案已经被广泛采纳和研究。

4.1.1 典型离子的掺杂

在电子传输材料掺杂改性中,Nb⁵⁺、Li⁺、Al³⁺、Mg²⁺等^[77-80]金属离子是最为典型的 n 型掺杂离子,对绝大多数本文提及的金属氧化物都具有适用性。如 Xiao 等^[77]利用水热-热分解法制备了 Nb⁵⁺ 掺杂 TiO₂ 电子传输层,与未掺杂的 TiO₂ 相比,掺杂的 TiO₂ 表面更加致密、光滑,有利于钙钛矿光活性层的沉积,使器件的 PCE 从 14.56% 提高到 15.97%。本团队^[81]通过利用脉冲激光沉积法将 Nb⁵⁺ 引入到了 TiO₂ 中并将其用作 PSCs 的电子传输层(图 6(a))。我们发现 Nb⁵⁺ 的引入能够极大地提高光生载流子在 Nb⁵⁺-TiO₂/钙钛矿界面的提取与运输效率,基于 Nb⁵⁺-TiO₂ 还制备了有效面积为 225 mm² 的刚性器件(图 6(b)),其 PCE 高达 11.5%。同时,我们还制备了 PCE 为 12.8% 的柔性 PSCs(图 6(c))。器件的示意图与实物图如图 6 所示。

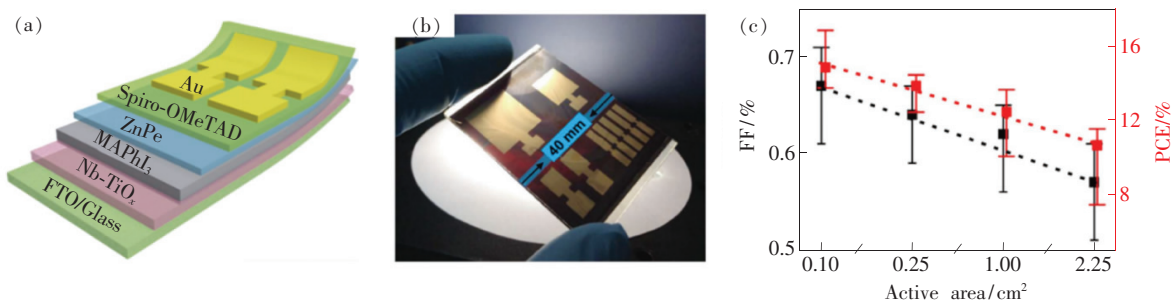


图 6 (a) 器件结构示意图; (b) 不同有效面积(2 mm × 5 mm, 5 mm × 5 mm, 10 mm × 10 mm, 15 mm × 15 mm) 的器件实物图; (c) 不同有效面积器件的填充因子、PCE 图^[81]。

Fig. 6 (a) Device architecture schematic diagram. (b) PSCs with different active areas (2 mm × 5 mm, 5 mm × 5 mm, 10 mm × 10 mm, 15 mm × 15 mm). (c) Device PCE and FF with four different active areas^[81].

4.1.2 稀土离子的掺杂

众所周知,有冶金维生素之称的稀土元素能够显著地改善金属化合物性能,其同样适合光伏领域性能的提升,因此, Y^{3+} 、 La^{3+} 、 Ce^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 等^[82-87] 稀土离子已经被用来提高金属氧化物电子传输材料的半导体性能,其中又以 Y^{3+} 、 La^{3+} 研究更为成熟。如 Deng 等^[88] 对 TiO_2 纳米棒进行 Y^{3+} 掺杂,结果表明适量的 Y/Ti 量比能增加纳米棒的密度,提高 TiO_2 电子传输层/钙钛矿界面的电荷输运性与注入效率,使器件表现出 18.11% 的最佳 PCE。Xu 等^[84] 用 La^{3+} - SnO_2 来缓解晶体的聚集现象并提高均匀性, La^{3+} 的掺杂还能够提高电荷的提取效率、降低载流子的复合,使器件的 PCE 从 14.24% 提高到 17.08%。我们课题组^[86-87] 利用脉冲激光沉积法实现了 Sm^{3+}/Eu^{3+} 共掺杂的 TiO_2 电子传输层的制备,稀土离子的共掺杂能够提高电荷的分离速率并降低电荷的复合,使器件 PCE 从 17.56% 增加到 19.01%。此外,我们发现共掺杂能够将高能量的紫外光转化为可见光,增加钙钛矿光活性层吸收的同时还提高了器件的紫外光稳定性。不可否认,稀土离子掺杂 TiO_2 的研究将对整个金属氧化物电子传输材料家族的光电性能提升具有重要参考意义。

4.1.3 其他离子的掺杂

除了上文提及的典型离子与稀土离子掺杂外,其他离子如 Cs^+ 、 In^{3+} 、 Zr^{4+} 、 Zn^{2+} 、 Ta^{5+} 和 Fe^{3+} 等金属离子^[6,89-92],以及 Cl^- 、 F^- 和 N^{3-} 等非金属离子,也被用来提高金属氧化物电子传输材料的载流子传输性质,这些离子的掺杂基质主要以 TiO_2 为主。如 Cui 等^[90] 为提高 TiO_2 纳米棒阵

列电子传输能力和与钙钛矿吸光层能级匹配,用 Ta^{5+} 对 TiO_2 纳米棒进行了掺杂,结果表明, Ta^{5+} 的微量掺杂能够减少 TiO_2 纳米棒表面的氧空位,改善 TiO_2 纳米棒/钙钛矿界面的能级匹配。 Cl^- 是典型的非金属掺杂离子且对 TiO_2 获得了很好的结果,如 Tan 等^[93] 利用 Cl^- 离子掺杂 TiO_2 胶体纳米晶能够显著提高 Cl^- - TiO_2 /钙钛矿层界面结合,有效缓解了载流子在界面的复合,最后得到具有优异稳定性和 PCE (20.1%) 的器件,图 7(a)、(b) 分别为器件横截面 SEM 图和 $J-V$ 曲线。

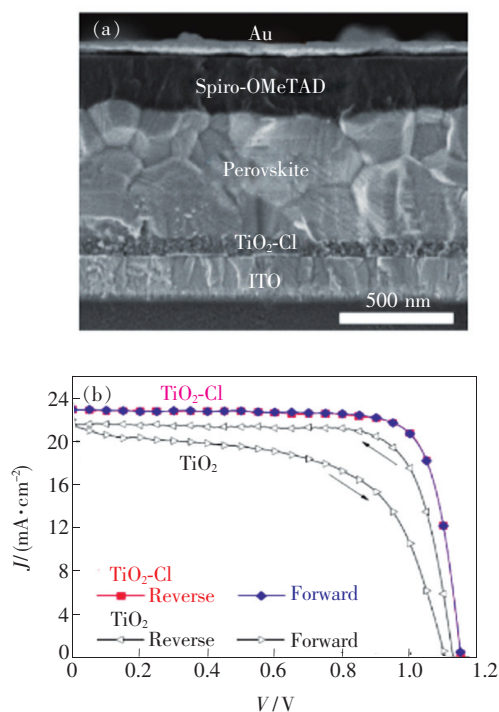


图 7 (a) 器件横截面 SEM 图; (b) 器件正反扫 $J-V$ 曲线图^[93]。

Fig. 7 (a) Device cross-sectional SEM. (b) $J-V$ curves of PSCs measured at reverse and forward scans^[93].

通常,在 PSCs 中对 TiO_2 等金属氧化物电子传输材料进行离子掺杂会对其电学、薄膜结晶性、缺陷以及能级结构等方面产生重要影响。表 2 总结了几种典型离子对 TiO_2 的掺杂作用和机理,其他未被探究的金属和非金属离子可以参考。

本文还总结了 TiO_2 中的一些典型掺杂元素、

一般掺杂元素以及潜在掺杂元素,如图 8 所示。本文提及的其他金属氧化物半导体与 TiO_2 具有相似的能级结构和晶体结构,在满足晶格匹配的前提下,掺杂离子对其他金属氧化物半导体的光电特性以及 PSCs 的光伏性能的影响可以参考借鉴。

表 2 TiO_2 的掺杂离子及机理总结

Tab. 2 Summary of TiO_2 doping ion and mechanism

掺杂离子	掺杂作用及机理
Nb^{5+}	载流子动力学;缺陷工程;薄膜结晶性
Li^+	缺陷工程;载流子动力学
Al^{3+}	载流子动力学
Mg^{2+}	能级工程;缺陷工程
B^{3+} 、 In^{3+} 、 Zr^{4+} 、 Ta^{5+} 、 Cl^- 等	能级工程;载流子动力学;薄膜结晶性;缺陷工程
稀土离子	能级工程;载流子动力学;薄膜结晶性;缺陷工程

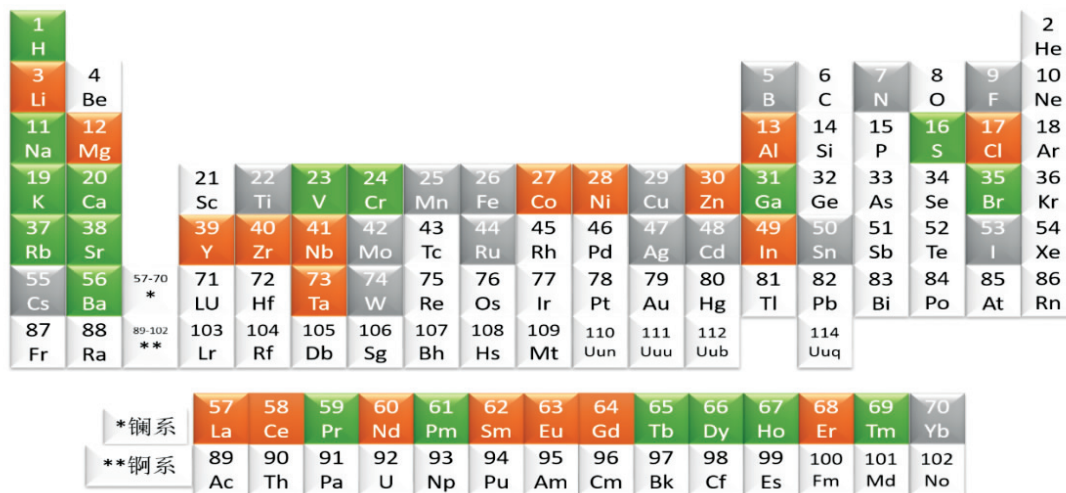


图 8 到目前为止元素周期表中对 TiO_2 掺杂总结(橙色表示典型的掺杂,灰色为一般掺杂,绿色为潜在掺杂)

Fig. 8 Summarize the doping of TiO_2 electron transport materials so far in the periodic table(Orange indicates the doping that is emphasized, Grey is generally doping, Green indicates the potential doping in the future)

4.2 金属氧化物电子传输层的界面修饰

因电子传输层/钙钛矿光活性层界面决定着光生载流子的提取与输运,所以界面修饰和改性对提高 PSCs 性能具有重要作用。本部分主要从氧化物/无机材料结构和氧化物/有机材料结构两个方面进行介绍。

4.2.1 氧化物/无机材料结构电子传输层

氧化物/无机材料结构的电子传输层主要以无机半导体修饰为主,也称复合电子传输层,如常见的 $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ 、 TiO_2/ZnO 、 SnO_2/ZnO 、 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ 、 SnO_2/CdS 等双电子传输层结构^[7, 94-97]。通过抑制电子传输层表面缺陷、改善钙钛矿吸光层薄膜

质量、能级结构等方面可以提高金属氧化物电子传输层的光电性能。Mali 等^[94]用旋涂法制备了 $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ 复合电子传输层并将其应用在 PSCs 中,该复合电子传输层能够展现无针孔且均匀性良好的形貌,显著提高了器件的开路电压和填充因子,最后实现了 20.5% 的 PCE。Kumari 等^[95]利用喷涂法合成了双层 TiO_2/ZnO 电子传输层,研究发现 ZnO 层能够减少电荷复合,使 PSCs 的性能得到大幅提升。Mohamadkhani 等^[97]利用 CdS 作为钝化层来修饰 SnO_2 ,通过莫特-肖特基分析表明 CdS 纳米粒子能够使 SnO_2 的电子亲和能发生变化,使器件具有更高的填充因子、更低的迟

滞效应。此外,除上文提及常见无机半导体外, Al_2O_3 ^[98]、 KCl ^[99]等也能对金属氧化物的表面起到钝化和修饰作用。

4.2.2 氧化物/有机材料结构电子传输层

有机分子富勒烯及其衍生物具有载流子迁移率高以及能级结构匹配性好的优点。除了将其独自用作电子传输层外,还可以用来修饰金属氧化物,进而构成氧化物/有机材料结构复合双层电子传输层如 ZnO/PCBM ^[100]、 SnO_2/PCBM ^[101]等。利用有机材料与金属氧化物的协同作用或将其用作表面缺陷钝化层来提高器件性能。如 Qiu 等^[102]利用 PCBM 钝化 ZnO 来提高其与 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_x\text{Cl}_{3-x}$ 吸光层之间的能级匹配,PCBM 钝化层良好的成膜性还能有效避免因钙钛矿材料与导电玻璃的直接接触而导致的漏电现象,增加了器件在空气中的稳定性。Zhou 等^[103]基于溶液制备工艺合成了富勒烯 $\text{C}_{60}/\text{TiO}_2$ 双层电子传输层并将其应用在柔性 PSCs 中,富勒烯 C_{60} 修饰层不仅提高了钙钛矿层的结晶性,而且还促进了电荷在界面处的输运过程,使得器件在弯曲循环 1 500 次以后,仍具有 16% 的 PCE。

此外,一些无机碳纳米材料也可作为金属氧化物的钝化层或修饰层,如石墨烯、碳纳米量子点等^[47,104],也取得了非常优异的改性效果。

到目前为止,掺杂和界面修饰在金属氧化物电子传输材料中的研究已经取得了一定进展,这类策略能够显著提高 PSCs 的光电性能与稳定性。此外,掺杂与界面修饰不仅适用于电子传输层,同样适用于钙钛矿光活性层与空穴传输层的性能提升。随着科研工作者对掺杂或界面修饰材料的种类、结构以及工艺的不断深入探索,定能加快 PSCs 的商业化应用进程。

5 结论与展望

金属氧化物具有高电子迁移率、高透光性、可调节带隙和良好的化学稳定性的优点,被研究人员作为一类最为常用和最为典型的电子传输材料应用在 PSCs 中。本文详细叙述了半导体金属氧化物的制备工艺、种类、特性以及掺杂和界面修饰等方面的研究进展,期望能够为金属氧化物电子传输材料的下一步研究方向和改性策略提供参考。毫无疑问,这些金属氧化物的发展对 PSCs 的稳定性和 PCE 起着至关重要的作用。因此我们

要不断优化半导体金属氧化物的组成、制备工艺、掺杂和界面修饰来提高 PSCs 器件的性能,加速其商业化的进程。半导体金属氧化物的发展也会促进光电探测器、发光二极管、晶体管、二次电池以及光通信等领域的发展。

最后,我们对半导体金属氧化物电子传输材料未来的研究进行了展望,期望研究人员可以从以下几方面进行深入探索,从而设计出更加高效、更加稳定的电子传输材料。

(1)除本文中提及的金属氧化物外,应继续开发和研究导电性、透光性、能级结构和稳定性等综合性能更加优异的新型金属氧化物半导体材料,或有机电子传输材料(富勒烯及其衍生物、有机小分子)以及二维半导体材料(黑磷、石墨烯、硫化物 MoS_2 、 TiS_2)等。最重要的是,要与钙钛矿材料有良好的兼容性。研究人员可以通过对传统氧化物的表面进行物理处理和化学修饰来进一步提高其稳定性和载流子迁移特性,也可以对现有材料的结构进行更为深入的设计和优化,以获得综合光电性能更加优异的电子传输材料,同时要兼顾成本低廉且能规模化生产。

(2)现有的电子传输层制备技术都需要 500 °C 左右的高温退火过程来促进半导体金属氧化物电子传输层的结晶,这极大地限制了 PSCs 的大面积生产和柔性可穿戴应用;传统物理沉积技术如脉冲激光沉积和电子束蒸发等对实验条件要求比较苛刻,所以亟需开发一些低温大面积生产制备技术,比如利用气流辅助的刮涂和喷涂技术来辅助半导体金属氧化物的成膜和结晶。期望这方面的研究能够有所发展。

(3)金属氧化物纳米结构形貌对电荷输运性能、表面覆盖率与孔隙分布、器件结构、与钙钛矿层的物理接触、载流子的界面动力学等有着密切的联系,应进一步深入探索。例如,纳米棒和纳米线结构的材料具有良好的单向载流子传输特性,如何将稳定性良好的三元氧化物材料像 ZnO 一样垂直生长在基底上,获得垂直方向高效的载流子传输策略也值得思考。

(4)电子传输材料的最重要性能就是要实现良好的电子传输,而 n 型掺杂是提高材料电子迁移性能的关键。尽管现阶段很多离子的修饰都能提高半导体氧化物材料的载流子传输性能,但其真正的作用机制是“晶格掺杂”还是“表面缺陷钝

化”,在很多已有的研究中尚未清晰,还需要从原子尺度以及原位的手段进行精确表征,比如利用高分辨球差校正透射电镜等手段来对改性的本质进行揭示,将更有说服力和指导意义。

参 考 文 献:

- [1] CHEN J B, DONG H, ZHANG L, *et al.*. Graphitic carbon nitride doped SnO₂ enabling efficient perovskite solar cells with PCEs exceeding 22% [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2020, 8(5):2644-2653.
- [2] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, *et al.*. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, 131(17):6050-6051.
- [3] NREL. The National Renewable Energy Laboratory is a national laboratory of the U. S. [EB/OL]. [2020-03-10]. <https://www.nrel.gov/>.
- [4] CHEN W, SHI Y Q, WANG Y, *et al.*. N-type conjugated polymer as efficient electron transport layer for planar inverted perovskite solar cells with power conversion efficiency of 20.86% [J]. *Nano Energy*, 2020, 68:104363.
- [5] TAVAKOLI M M, YADAV P, TAVAKOLI R, *et al.*. Surface engineering of TiO₂ ETL for highly efficient and hysteresis-less planar perovskite solar cell (21.4%) with enhanced open-circuit voltage and stability [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2018, 8:1800794-1-9.
- [6] REHMAN F, MAHMOOD K, KHALID A, *et al.*. Solution-processed barium hydroxide modified boron-doped ZnO bilayer electron transporting materials: toward stable perovskite solar cells with high efficiency of over 20.5% [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2019, 535:353-362.
- [7] WANG P Y, LI R J, CHEN B B, *et al.*. Gradient energy alignment engineering for planar perovskite solar cells with efficiency over 23% [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(6):1905766.
- [8] LUO J, WANG Y X, ZHANG Q F. Progress in perovskite solar cells based on ZnO nanostructures [J]. *Solar Energy*, 2018, 163:289-306.
- [9] ZHEN C, WU T T, CHEN R Z, *et al.*. Strategies for modifying TiO₂ based electron transport layers to boost perovskite solar cells [J]. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2019, 7(5):4586-4618.
- [10] CHEN Y C, MENG Q, ZHANG L R, *et al.*. SnO₂-based electron transporting layer materials for perovskite solar cells: a review of recent progress [J]. *J. Energy Chem.*, 2019, 35:144-167.
- [11] MA J J, ZHENG X L, LEI H W, *et al.*. Highly efficient and stable planar perovskite solar cells with large-scale manufacture of E-beam evaporated SnO₂ toward commercialization [J]. *Solar RRL*, 2017, 1(10):1700118.
- [12] CHEN D Z, SU A X, LI X Y, *et al.*. Efficient planar perovskite solar cells with low-temperature atomic layer deposited TiO₂ electron transport layer and interfacial modifier [J]. *Solar Energy*, 2019, 188:239-246.
- [13] CHEN C, CHENG Y, DAI Q L, *et al.*. Radio frequency magnetron sputtering deposition of TiO₂ thin films and their perovskite solar cell applications [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 5:17684-1-12.
- [14] RYU G I, KIM B, KO S G, *et al.*. Effects of chemical bath-deposited TiO₂ compact layer on the performance of the fully screen-printable hole-transport material-free mesoscopic perovskite solar cells with a carbon electrode [J]. *J. Electron. Mater.*, 2019, 48(9):5857-5864.
- [15] LIU C, ZHANG L Z, ZHOU X Y, *et al.*. Hydrothermally treated SnO₂ as the electron transport layer in high-efficiency flexible perovskite solar cells with a certificated efficiency of 17.3% [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(47):1807604.
- [16] YANG D, YANG R X, WANG K, *et al.*. High efficiency planar-type perovskite solar cells with negligible hysteresis using EDTA-complexed SnO₂ [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9:3239-1-11.
- [17] HAGFELDT A, BOSCHLOO G, SUN L C, *et al.*. Dye-sensitized solar cells [J]. *Chem. Rev.*, 2010, 110(11):6595-6663.
- [18] ZHOU H P, CHEN Q, LI G, *et al.*. Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells [J]. *Science*, 2014, 345(6196):542-546.
- [19] QIU J H, QIU Y C, YAN K Y, *et al.*. All-solid-state hybrid solar cells based on a new organometal halide perovskite sensitizer and one-dimensional TiO₂ nanowire arrays [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(8):3245-3248.

- [20] LIU C W, ZHU R X, NG A, *et al.*. Investigation of high performance TiO₂ nanorod array perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5(30):15970-15980.
- [21] YANG H Y, RHO W Y, LEE S K, *et al.*. TiO₂ nanoparticles/nanotubes for efficient light harvesting in perovskite solar cells [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(3):326-1-10.
- [22] YANG L K, WANG X, MAI X M, *et al.*. Constructing efficient mixed-ion perovskite solar cells based on TiO₂ nanorod array [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2019, 534:459-468.
- [23] YELLA A, HEINIGER L P, GAO P, *et al.*. Nanocrystalline rutile electron extraction layer enables low-temperature solution processed perovskite photovoltaics with 13.7% efficiency [J]. *Nano Lett.*, 2014, 14(5):2591-2596.
- [24] GIORDANO F, ABATE A, BAENA J P C, *et al.*. Enhanced electronic properties in mesoporous TiO₂ via lithium doping for high-efficiency perovskite solar cells [J]. *Nat. Commun.*, 2016, 7:10379-1-6.
- [25] BI W B, WU Y J, ZHANG B X, *et al.*. Enhancing photostability of perovskite solar cells by Eu(TTA)₂(Phen)MAA interfacial modification [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(12):11481-11487.
- [26] JANOTTI A, VAN DE WALLE C G. Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2009, 72(12):126501-1-29.
- [27] ZHANG P, WU J, ZHANG T, *et al.*. Perovskite solar cells with ZnO electron-transporting materials [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(3):1703737-1-20.
- [28] NAM S, VU T K, LE D T, *et al.*. Low-temperature solution process of Al-doped ZnO nano-flakes for flexible perovskite solar cells [J]. *J. Electrochem. Sci. Technol.*, 2018, 9(2):118-125.
- [29] PAUPORTÉ T. Synthesis of ZnO nanostructures for solar cells—a focus on dye-sensitized and perovskite solar cells [M]. LIRA-CANTU M. *The Future of Semiconductor Oxides in Next-generation Solar Cells*, Amsterdam:Elsevier, 2018:3-43.
- [30] MAHMOOD K, KHALID A, MEHRAN M T. Nanostructured ZnO electron transporting materials for hysteresis-free perovskite solar cells [J]. *Solar Energy*, 2018, 173:496-503.
- [31] ZHENG Y Z, ZHAO E F, MENG F L, *et al.*. Iodine-doped ZnO nanopillar arrays for perovskite solar cells with high efficiency up to 18.24% [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5(24):12416-12425.
- [32] KUMAR M H, YANTARA N, DHARANI S, *et al.*. Flexible, low-temperature, solution processed ZnO-based perovskite solid state solar cells [J]. *Chem. Commun.*, 2013, 49(94):11089-11091.
- [33] ZHENG D, WANG G, HUANG W, *et al.*. Combustion synthesized zinc oxide electron-transport layers for efficient and stable perovskite solar cells [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(16):1900265-1-10.
- [34] CAO J, WU B H, CHEN R H, *et al.*. Efficient, hysteresis-free, and stable perovskite solar cells with ZnO as electron-transport layer: effect of surface passivation [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30:1705596.
- [35] SI H N, LIAO Q L, ZHANG Z, *et al.*. An innovative design of perovskite solar cells with Al₂O₃ inserting at ZnO/perovskite interface for improving the performance and stability [J]. *Nano Energy*, 2016, 22:223-231.
- [36] HAN G S, SHIM H W, LEE S, *et al.*. Low-temperature modification of ZnO nanoparticles film for electron-transport layers in perovskite solar cells [J]. *ChemSusChem*, 2017, 10(11):2425-2430.
- [37] SONG J X, HU W D, WANG X F, *et al.*. HC(NH₂)₂PbI₃ as a thermally stable absorber for efficient ZnO-based perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2016, 4(21):8435-8443.
- [38] YANG G, LEI H W, TAO H, *et al.*. Reducing hysteresis and enhancing performance of perovskite solar cells using low-temperature processed Y-doped SnO₂ nanosheets as electron selective layers [J]. *Small*, 2017, 13(2):1601769.
- [39] MAHMOOD K, KHALID A, NAWAZ F, *et al.*. Low-temperature electrospray-processed SnO₂ nanosheets as an electron transporting layer for stable and high-efficiency perovskite solar cells [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2018, 532:387-394.
- [40] GAO C M, YUAN S, CAO B Q, *et al.*. SnO₂ nanotube arrays grown via an *in situ* template-etching strategy for effective and stable perovskite solar cells [J]. *Chem. Eng. J.*, 2017, 325:378-385.
- [41] BAI Y, FANG Y J, DENG Y H, *et al.*. Low temperature solution-processed Sb: SnO₂ nanocrystals for efficient planar perovskite solar cells [J]. *ChemSusChem*, 2016, 9(18):2686-2691.
- [42] MANSPEAKER C, SCRUGGS P, PREISS J, *et al.*. Reliable annealing of CH₃NH₃PbI₃ films deposited on ZnO [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2016, 120(12):6377-6382.
- [43] ZHU Z L, ZHENG X L, BAI Y, *et al.*. Mesoporous SnO₂ single crystals as an effective electron collector for perovskite solar

- cells [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015, 17(28):18265-18268.
- [44] LEE J H, SHIN D, RHEE R, *et al.*. Band alignment engineering between planar SnO₂ and halide perovskites via two-step annealing [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2019, 10(21):6545-6550.
- [45] GUO F W, SUN X Y, LIU B, *et al.*. Enhanced lifetime and photostability with low-temperature mesoporous ZrTiO₃/compact SnO₂ electrodes in perovskite solar cells [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, 58(51):18460-18465.
- [46] ANARAKI E H, KERMANPUR A, STEIER L, *et al.*. Highly efficient and stable planar perovskite solar cells by solution-processed tin oxide [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9(10):3128-3134.
- [47] WANG S, ZHU Y, LIU B, *et al.*. Introduction of carbon nanodots into SnO₂ electron transport layer for efficient and UV stable planar perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2019, 7(10):5353-5362.
- [48] FENG J S, YANG Z, YANG D, *et al.*. E-beam evaporated Nb₂O₅ as an effective electron transport layer for large flexible perovskite solar cells [J]. *Nano Energy*, 2017, 36:1-8.
- [49] WANG Z H, LOU J J, ZHENG X J, *et al.*. Solution processed Nb₂O₅ electrodes for high efficient ultraviolet light stable planar perovskite solar cells [J]. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2019, 7(7):7421-7429.
- [50] ALI F, PHAM N D, FAN L J, *et al.*. Low hysteresis perovskite solar cells using an electron-beam evaporated WO_{3-x} thin film as the electron transport layer [J]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2019, 2(8):5456-5464.
- [51] GHENO A, THU PHAM T T, DI BIN C, *et al.*. Printable WO₃ electron transporting layer for perovskite solar cells; influence on device performance and stability [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2017, 161:347-354.
- [52] JOHANSSON M B, MATSSON A, LINDQUIST S E, *et al.*. The importance of oxygen vacancies in nanocrystalline WO_{3-x} thin films prepared by DC magnetron sputtering for achieving high photoelectrochemical efficiency [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2017, 121(13):7412-7420.
- [53] QIN P L, FANG G J, SUN N H, *et al.*. P-type indium oxide thin film for the hole-transporting layer of organic solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(7):3118-3124.
- [54] QIN M C, MA J J, KE W J, *et al.*. Perovskite solar cells based on low-temperature processed indium oxide electron selective layers [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(13):8460-8466.
- [55] CHEN P, YIN X T, QUE M D, *et al.*. Bilayer photoanode approach for efficient In₂O₃ based planar heterojunction perovskite solar cells [J]. *J. Alloys Compd.*, 2018, 735:938-944.
- [56] HU W, LIU T, YIN X W, *et al.*. Hematite electron-transporting layers for environmentally stable planar perovskite solar cells with enhanced energy conversion and lower hysteresis [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5(4):1434-1441.
- [57] GRÄTZEL M. Photoelectrochemical cells [J]. *Nature*, 2001, 414(6861):338-344.
- [58] BOUHJAR F, MOLLAR M, ULLAH S, *et al.*. Influence of a compact α -Fe₂O₃ layer on the photovoltaic performance of perovskite-based solar cells [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2018, 165(2):H30-H38.
- [59] LUO Q, CHEN H J, LIN Y Z, *et al.*. Discrete iron(III) oxide nanoislands for efficient and photostable perovskite solar cells [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(34):1702090-1-9.
- [60] ZHAO F, GUO Y X, WANG X, *et al.*. Enhanced performance of carbon-based planar CsPbBr₃ perovskite solar cells with room-temperature sputtered Nb₂O₅ electron transport layer [J]. *Solar Energy*, 2019, 191:263-271.
- [61] DONG J, WU J H, JIA J B, *et al.*. Annealing-free Cr₂O₃ electron-selective layer for efficient hybrid perovskite solar cells [J]. *ChemSusChem*, 2018, 11(3):619-628.
- [62] VANGELISTA S, PIAGGE R, EK S, *et al.*. Structural, chemical and optical properties of cerium dioxide film prepared by atomic layer deposition on TiN and Si substrates [J]. *Thin Solid Films*, 2017, 636:78-84.
- [63] WANG X, DENG L L, WANG L Y, *et al.*. Cerium oxide standing out as an electron transport layer for efficient and stable perovskite solar cells processed at low temperature [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5(4):1706-1712.
- [64] PANDEY R, SAINI A P, CHAUJAR R. Numerical simulations; toward the design of 18.6% efficient and stable perovskite solar cell using reduced cerium oxide based ETL [J]. *Vacuum*, 2019, 159:173-181.
- [65] HU Q, WU J, JIANG C, *et al.*. Engineering of electron-selective contact for perovskite solar cells with efficiency exceeding 15% [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(10):10161-10167.
- [66] SHIN S S, YANG W S, NOH J H, *et al.*. High-performance flexible perovskite solar cells exploiting Zn₂SnO₄ prepared in solution below 100 °C [J]. *Nat. Commun.*, 2015, 6:7410-1-8.

- [67] DOU J, SHEN D L, LI Y F, *et al.*. Highly efficient perovskite solar cells based on a Zn_2SnO_4 compact layer [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(40):36553-36559.
- [68] KIM Y M, PARK C, KIM U, *et al.*. High-mobility BaSnO_3 thin-film transistor with HfO_2 gate insulator [J]. *Appl. Phys. Express*, 2016, 9:011201.
- [69] KIM H J, KIM U, KIM H M, *et al.*. High mobility in a stable transparent perovskite oxide [J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, 5(6):061102-1-3.
- [70] SHIN S S, YEOM E J, YANG W S, *et al.*. Colloidally prepared la-doped BaSnO_3 electrodes for efficient, photostable perovskite solar cells [J]. *Science*, 2017, 356(6334):167-171.
- [71] LIN W N, DING J F, WU S X, *et al.*. Electrostatic modulation of $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ interface transport in an electric double-layer transistor [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2014, 1(1):1300001-1-7.
- [72] BERA A, WU K W, SHEIKH A, *et al.*. Perovskite oxide SrTiO_3 as an efficient electron transporter for hybrid perovskite solar cells [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2014, 118(49):28494-28501.
- [73] NEOPHYTOU M, DE BASTIANI M, GASPARINI N, *et al.*. Enhancing the charge extraction and stability of perovskite solar cells using strontium titanate (SrTiO_3) electron transport layer [J]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2019, 2(11):8090-8097.
- [74] MALI S S, SHIM C S, HONG C K. Highly porous zinc stannate (Zn_2SnO_4) nanofibers scaffold photoelectrodes for efficient methyl ammonium halide perovskite solar cells [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5:11424-1-14.
- [75] ZHU L Z, YE J J, ZHANG X H, *et al.*. Performance enhancement of perovskite solar cells using a La-doped BaSnO_3 electron transport layer [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5(7):3675-3682.
- [76] OKAMOTO Y, SUZUKI Y. Mesoporous $\text{BaTiO}_3/\text{TiO}_2$ double layer for electron transport in perovskite solar cells [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2016, 120(26):13995-14000.
- [77] XIAO G N, SHI C W, LV K, *et al.*. Nb-doping TiO_2 electron transporting layer for efficient perovskite solar cells [J]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2018, 1(6):2576-2581.
- [78] NUMATA Y, ISHIKAWA R, SANEHIRA Y, *et al.*. Nb-doped amorphous titanium oxide compact layer for formamidinium-based high efficiency perovskite solar cells by low-temperature fabrication [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2018, 6(20):9583-9591.
- [79] HOU X, ZHOU J P, HUANG S M, *et al.*. Efficient quasi-mesoscopic perovskite solar cells using li-doped hierarchical TiO_2 as scaffold of scattered distribution [J]. *Chem. Eng. J.*, 2017, 330:947-955.
- [80] XIAO W, PU W H, WANG J W, *et al.*. Theoretical investigation of the structural and electronic properties of Al-decorated TiO_2 /perovskite interfaces [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, 492:369-373.
- [81] CHEN C, LI H, JIN J J, *et al.*. Highly enhanced long time stability of perovskite solar cells by involving a hydrophobic hole modification layer [J]. *Nano Energy*, 2017, 32:165-173.
- [82] DENG X L, WANG Y Q, CHEN Y, *et al.*. Yttrium-doped TiO_2 compact layers for efficient perovskite solar cells [J]. *Solid State Chem.*, 2019, 275:206-209.
- [83] XU Z, WU J H, WU T Y, *et al.*. Tuning the fermi level of TiO_2 electron transport layer through europium doping for highly efficient perovskite solar cells [J]. *Energy Technol.*, 2017, 5(10):1820-1826.
- [84] XU Z H, TEO S H, GAO L G, *et al.*. La-doped SnO_2 as ETL for efficient planar-structure hybrid perovskite solar cells [J]. *Org. Electron.*, 2019, 73:62-68.
- [85] JIN J J, LI H, BI W B, *et al.*. Efficient and stable perovskite solar cells through e-beam preparation of cerium doped TiO_2 electron transport layer, ultraviolet conversion layer CsPbBr_3 and the encapsulation layer Al_2O_3 [J]. *Solar Energy*, 2020, 198:187-193.
- [86] CHEN C, LIU D L, WU Y J, *et al.*. Dual interfacial modifications by conjugated small-molecules and lanthanides doping for full functional perovskite solar cells [J]. *Nano Energy*, 2018, 53:849-862.
- [87] ZHANG B X, SONG Z L, JIN J J, *et al.*. Efficient rare earth co-doped TiO_2 electron transport layer for high-performance perovskite solar cells [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2019, 553:14-21.
- [88] DENG X L, WANG Y Q, CUI Z D, *et al.*. Y-doping TiO_2 nanorod arrays for efficient perovskite solar cells [J]. *Superlatt. Microstr.*, 2018, 117:283-287.
- [89] RAKNUAL D, SUTTIYARAK P, TUBTINTAE A, *et al.*. Effect of indium doping in Nb_2O_5 thin films for electron transport

- layers; investigation of structural, optical, and electrical properties [J]. *Mater. Lett.*, 2020, 259:126828.
- [90] CUI Q, ZHAO X C, LIN H, *et al.*. Improved efficient perovskite solar cells based on ta-doped TiO₂ nanorod arrays [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(47):18897-18907.
- [91] SHIN S G, KIM S, BARK C W, *et al.*. Characterization of perovskite solar cell with Fe³⁺ doped TiO₂ layer [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2020, 20(1):552-556.
- [92] WU M C, CHAN S H, JAO M H, *et al.*. Enhanced short-circuit current density of perovskite solar cells using Zn-doped TiO₂ as electron transport layer [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2016, 157:447-453.
- [93] TAN H R, JAIN A, VOZNYI O, *et al.*. Efficient and stable solution-processed planar perovskite solar cells *via* contact passivation [J]. *Science*, 2017, 355(6326):722-726.
- [94] MALI S S, PATIL J V, ARANDIYAN H, *et al.*. Reduced methylammonium triple-cation Rb_{0.05}(FAPBI₃)_{0.95}(MAPbBr₃)_{0.05} perovskite solar cells based on a TiO₂/SnO₂ bilayer electron transport layer approaching a stabilized 21% efficiency: the role of antisolvents [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2019, 7(29):17516-17528.
- [95] KUMARI N, GOHEL J V, PATEL S R. Optimization of TiO₂/ZnO bilayer electron transport layer to enhance efficiency of perovskite solar cell [J]. *Mater. Sci. Semicond. Processing*, 2018, 75:149-156.
- [96] LI Z X, WANG R, XUE J J, *et al.*. Core-shell ZnO@SnO₂ nanoparticles for efficient inorganic perovskite solar cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, 141(44):17610-17616.
- [97] MOHAMADKHANI F, JAVADPOUR S, TAGHAVINIA N. Improvement of planar perovskite solar cells by using solution processed SnO₂/cds as electron transport layer [J]. *Solar Energy*, 2019, 191:647-653.
- [98] MAHMOUDI T, WANG Y S, HAHN Y B. SrTiO₃/Al₂O₃-graphene electron transport layer for highly stable and efficient composites-based perovskite solar cells with 20.6% efficiency [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2020, 10(2):1903369-1-9.
- [99] ZHU P C, GU S, LUO X, *et al.*. Simultaneous contact and grain-boundary passivation in planar perovskite solar cells using SnO₂-KCL composite electron transport layer [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2020, 10(3):1903083.
- [100] ZHANG J Q, TAN C H, DU T, *et al.*. ZnO-PCBM bilayers as electron transport layers in low-temperature processed perovskite solar cells [J]. *Sci. Bull.*, 2018, 63(6):343-348.
- [101] KE W J, ZHAO D W, XIAO C X, *et al.*. Cooperative tin oxide fullerene electron selective layers for high-performance planar perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2016, 4(37):14276-14283.
- [102] QIU W M, BUFFIÈRE M, BRAMMERTZ G, *et al.*. High efficiency perovskite solar cells using a PCBM/ZnO double electron transport layer and a short air-aging step [J]. *Org. Electron.*, 2015, 26:30-35.
- [103] ZHOU Y Q, WU B S, LIN G H, *et al.*. Interfacing pristine C₆₀ onto TiO₂ for viable flexibility in perovskite solar cells by a low-temperature all-solution process [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2018, 8:1800399.
- [104] PANG S Z, ZHANG C F, ZHANG H R, *et al.*. Boosting performance of perovskite solar cells with graphene quantum dots decorated SnO₂ electron transport layers [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2020, 507:145099.



朱立华(1994-),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,2018年于河北建筑工程学院获得学士学位,主要从事钙钛矿太阳能电池中新型电子传输材料的开发与研究。
E-mail: ZHULIHUA94@163.com



宋宏伟(1967-),男,黑龙江阿城人,博士,教授,博士研究生导师,1996年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位,主要从事稀土发光材料物理、光电子及生物应用的研究。
E-mail: songhw@jlu.edu.cn



陈聪(1990-),男,吉林长春人,博士,副教授,2019年于吉林大学获得博士学位,主要从事高效与长时稳定的钙钛矿太阳能电池的研究。
E-mail: chencong@hebut.edu.cn

编委介绍:

宋宏伟,教授,博士研究生导师,1996年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位,先后在中国科学院物理研究所、日本名古屋工业大学和美国伯克利加州大学做博士后,2000年入选中科院人才引进计划到长春光机所工作(研究员),2007年至今就职于吉林大学。国家杰出青年基金获得者(2009年),万人计划领军人才(2018年),科技部重点领域创新团队负责人(2017年)。主要从事钙钛矿量子点发光、钙钛矿太阳能电池与光电探测器的研究。代表性成果:(1)在国际上率先实现了钙钛矿量子点中稀土离子的掺杂,获得了量子效率146%的量子剪裁发光材料,使硅电池光电效率提高3.4个百分点。(2)采用荧光转换的方法,首次获得了具有能量存储功能的钙钛矿电池;获得最佳电池效率22.16%,长时稳定性5000h。(3)开拓了半导体表面等离子体、光子晶体与表面等离子体级连调控等新方法,提高上转换发光。在*Adv. Mater.*,*Adv. Energy Mater.*,*Nano Lett.*等期刊发表SCI论文320余篇,累计SCI引用逾10000次,入选2014—2018年中国高被引学者榜单(材料学)。获吉林省自然科学奖一等奖(2019年,排名第一),高等学校优秀科研成果自然科学二等奖(2008年,排名第一),吉林省科技进步一等奖(2010年,排名第二),国家自然科学奖二等奖(2011年,排名第二)等奖励。担任中国稀土学会发光专业委员会委员、中国物理学会发光分会委员。*Scientific Report*,《发光学报》编委。