

# 新型钙钛矿太阳能电池研究进展

李新利<sup>1,2\*</sup>, 李丽华<sup>1</sup>, 黄金亮<sup>1</sup>, 任凤章<sup>1</sup>, 卢景霄<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 郑州大学物理工程学院材料物理教育部重点实验室, 河南 郑州 450052)

**摘要:**综述了当前国内外关于钙钛矿太阳能电池的最新研究进展,介绍了钙钛矿太阳能电池的发展背景、基本结构及工作原理,重点论述了钙钛矿光吸收层材料、电子和空穴传输层材料的选择、发展,分析了各自的优缺点及存在的问题。

**关键词:**太阳能电池; 钙钛矿光吸收材料; 空穴传输材料; 电子传输材料

中图分类号: TN36

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)09-0044-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.09.011

## Research progress of new-type perovskite solar cells

LI Xin-li<sup>1,2\*</sup>, LI Li-hua<sup>1</sup>, HUANG Jin-liang<sup>1</sup>, REN Feng-zhang<sup>1</sup>, LU Jing-xiao<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023,

China; 2. The Key Laboratory of Materials Physics of Ministry of Education, School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The research progress of perovskite solar cell is reviewed. Its basic structure and working principle are introduced. The perovskite light absorber layer materials, selection of hole transport material and electron transport materials are highlighted. Their advantages and disadvantages and existing problems are also analyzed.

**Key words:** solar cell; perovskite light absorber layer; hole transport material; electron transport material

经济的快速发展加速了对能源的需求,而化石类能源由于储量有限,开发新能源势在必行。太阳能具有清洁、无污染并且取之不尽、用之不竭的特点,如何充分高效利用太阳能是一个备受关注的问题。太阳能电池则是利用太阳能的有效手段之一。目前,晶体硅电池在光伏市场中占据重要份额,但是其性价比还无法与常规能源相竞争,另外制备过程中的污染及能耗问题也在一定程度上制约了其广泛应用。因此,寻找开发新型、环保、高效、低成本的太阳能电池是大家关注的重点。

近期,在光伏领域出现了一颗新星,即钙钛矿太阳能电池。它吸引了众多科研者的关注,被《Science》杂志评为2013年十大科学突破之一。这种电池是在染料敏化太阳能电池基础上发展起来的,它把染料敏化电池中的液体电解质替换为具有钙钛矿结构的固态电解质材料,也就是说采用有机金属卤化物( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ,  $\text{X} = \text{Br}, \text{I}, \text{Cl}$ )代替了传统的染料N719,所以称其为钙钛矿太阳能电池。这种电池虽然起步较晚,但是其效率发展之快令人刮

目相看,在2009年发展之初其光电转换效率仅有3.8%<sup>[1]</sup>,经过2年时间其效率翻倍达到6.5%<sup>[2]</sup>,2014年效率提升到19.3%<sup>[3]</sup>,钙钛矿太阳能电池效率从2012年之后呈现快速发展的趋势,由于其转换效率的快速提高加大了国内外研究者的关注力度。

## 1 钙钛矿太阳能电池结构及工作原理

钙钛矿太阳能电池的结构主要包括两大类,一种是由染料敏化电池演化而来,称为“敏化”结构,主要包括光阳极、电子传输层、钙钛矿光吸收层、空穴传输层(hole transport materials, HTM)和对电极,如图1(a)所示;另外一种为平面异质结构,如图1(b)所示。这2种结构的电池主要差异是有无介孔层,即钙钛矿材料的支撑骨架层。平面异质结电池根据各层沉积顺序的不同,又分为p-i-n型和n-i-p型。此外,在异质结构的基础上还发展了无空穴传输层的钙钛矿太阳能电池。中科院大连物化所Zhou等<sup>[4]</sup>根据电池结构的差异把电池分成3种类型:介观敏化太阳能电池(mesoscopic sensitized solar

收稿日期:2015-12-31;修回日期:2016-06-15

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(15A430023);河南省国际科技合作计划项目(152102410035);河南科技大学青年基金(2015QN015);河南科技大学博士启动基金(13480069)

作者简介:李新利(1981-),女,博士,讲师,研究方向为太阳能电池材料及器件,通讯联系人,0379-64231269, lily2012@haust.edu.cn。

cells), 无空穴传输层的介观 p-n 结型太阳能电池 (HTM-free mesoscopic p-n solar cells) 和 p-i-n 型太阳能电池 (p-i-n solar cell)。

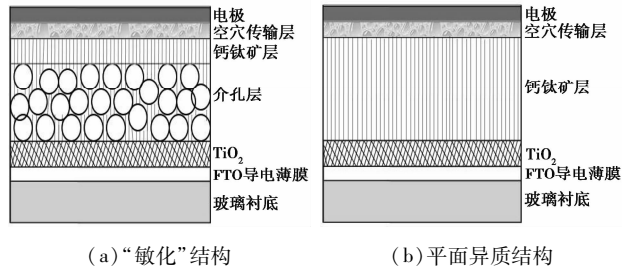


图1 钙钛矿太阳能电池结构示意图

一般来说, 太阳能电池的工作原理都可以分为光吸收、电荷分离、电荷输运、电荷收集。当有太阳光激发时, 钙钛矿吸收层产生光生载流子或者称为光激子, 载流子在电子传输层与钙钛矿材料的界面和空穴传输层与钙钛矿材料的界面处发生分离, 电子通过电子传输层到顶光阳极; 空穴通过空穴传输层到达对电极, 通过外电路连接, 光阳极电子和对电极空穴在对电极处复合, 构成回路。

## 2 钙钛矿太阳能电池各层研究进展

### 2.1 钙钛矿光吸收层

钙钛矿最早是由俄罗斯矿物学家 A. von Perovski 在乌拉尔山的变质岩中发现的, 并以他的名字 Perovski 命名, 早期特指  $\text{CaTiO}_3$ 。典型的钙钛矿化合物化学式为  $\text{ABX}_3$ , 其中 A 和 B 代表阳离子, X 代表阴离子, 图 2 所示为典型钙钛矿晶胞结构示意图。在钙钛矿太阳能电池中有机-无机杂化钙钛矿材料是指有机金属卤化物  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{MX}_3$  ( $\text{M} = \text{Pb}, \text{Sn}, \text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ), A 为甲胺基 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3$ ), B 为铅或锡原子, X 为氯、溴、碘等卤素原子。碘化铅甲胺 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) 是直接带隙材料, 其禁带宽度为 1.5 eV 左右, 消光系数高, 几百纳米厚度的薄膜就可以充分吸收 800 nm 以下的太阳光。选择钙钛矿材料作为电池的吸收层, 首先是其具有高的载流子迁移率<sup>[5-7]</sup>, 其次从可见光到近红外区域有较大的

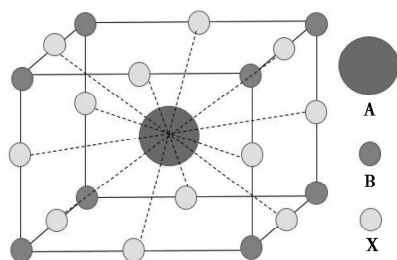


图2 钙钛矿结构  $\text{ABX}_3$  晶胞结构示意图

吸收系数, ( $\text{CH}_3\text{NH}_3$ ) $\text{PbI}_3$  在 550 nm 附近的消光系数是  $1.5 \times 10^5 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{cm})$ , 比固态敏化太阳能电池中其他有机染料的消光系数要高 2~3 倍<sup>[8]</sup>。

钙钛矿太阳能电池的研究始于 2009 年, Kojima 等<sup>[1]</sup> 首次采用卤铅铋钙钛矿 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  和  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ ) 材料作为敏化剂用于敏化结构纳米  $\text{TiO}_2$  多孔薄膜, 组装成液态电解质染料敏化太阳能电池, 获得光电转换效率分别为 3.81% 和 3.13%。2011 年, Im 等<sup>[2]</sup> 把  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  这种材料作为量子点制备在介观  $\text{TiO}_2$  薄膜上, 仍采用液态电解质, 这时光电转换效率提高到 6.5%。由于钙钛矿材料在液态电解质中不稳定, 会发生分解, 导致电池效率迅速衰减。随后, Kim 等<sup>[8]</sup> 采用 spiro-MeOTAD 有机材料, Christians 等<sup>[9]</sup> 采用无机的 CuI 作为固态空穴传输层 (HTMs), 替代了液态的电解质, 制备了  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  敏化的钙钛矿太阳能电池, 从而大大提高了电池的稳定性。钙钛矿太阳能电池效率从 2012 年之后呈现快速发展的趋势, 2014 年已经达到 19.3%。

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  薄膜的制备方法有多种, Liu 等<sup>[7]</sup> 率先采用双源气相法进行沉积, 获得了较高的电池效率, 奠定了该研究组在该领域的世界领先地位。也有研究者采用两步液相-气相辅助法<sup>[10]</sup> 成膜, 以及液相等。其中液相法又分为一步法<sup>[11]</sup> 和两步法<sup>[6]</sup>。一步法是将  $\text{PbI}_2$  和  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  分别溶于 DMF 或者 GBL 和 DMSO 中, 然后进行旋涂、干燥和退火; 两步法是, 首先在衬底上制备  $\text{PbI}_2$  薄膜, 然后通过旋涂  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  溶液或者蒸发  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  粉末, 使之与  $\text{PbI}_2$  发生反应生成  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 。在旋涂过程中, 如旋转速度、时间、温度、溶液的润湿性以及黏稠度等参数的调整和优化对获得优质的钙钛矿薄膜有重要的影响。有研究者对比了一步法和两步法制备钙钛矿薄膜电池的差异<sup>[12]</sup>, 证实了当钙钛矿薄膜的表面形貌和界面性能较好时, 电池的性能更优异, 也就是说控制钙钛矿薄膜的表面形貌是获得高的光电效率的一个重要手段。两步法获得的薄膜其均匀性要优于一部法。钙钛矿的表面形貌和微观结构对电池性能起着非常关键的作用。采用溶液法制备电池的光吸收层时表面覆盖情况较差, 并且会有缺陷和杂质。但是采用升华法制备时钙钛矿材料的表面平整, 杂质少, 纯净度高。

用于钙钛矿电池吸收层的不仅只有 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3$ ) $\text{PbI}_3$  和 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3$ ) $\text{PbBr}_3$ , 少量氯元素掺杂的 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3$ ) $\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  材料可以提高电子的迁移率,

能呈现更加优异的光电性能。Xing 等<sup>[13]</sup>和 Stranks 等<sup>[5]</sup>分别研究了载流子在  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbI}_3$  和  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  中的扩散长度,结果表明,在  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbI}_3$  中电子和空穴的扩散长度分别为 130、100 nm,在后者中电子和空穴的扩散长度分别为 1 100、1 200 nm。造成电子和空穴的扩散长度在铅基钙钛矿材料中的差异这么大的主要原因是和材料的制备方法、材料的质量以及晶粒大小等有关系。对铅基钙钛矿薄膜进行退火,若温度高于 100℃,则恶化了载流子的扩散行为,并且导致了薄膜中  $\text{PbI}_2$  含量的升高。由于铅的毒性,有研究者提出采用 Sn 来代替 Pb 形成锡基的钙钛矿材料。但铅基钙钛矿材料如  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  和  $\text{HC}(\text{NH}_2)_2\text{PbI}_3$  要比锡基的钙钛矿材料有更高的光吸收系数<sup>[14]</sup>。Zuo 等<sup>[15]</sup>通过 Sn 掺杂来增强  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  钙钛矿材料的光吸收能力,使钙钛矿太阳能电池的短路电流密度由  $13.3 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$  提高到  $19.1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ ,相应的二维平面钙钛矿太阳电池的最高光电转换效率达到了 10.10%。

## 2.2 电子传输层

电子传输层在钙钛矿中的作用主要是与钙钛矿光吸收层形成电子选择性接触,这就要求具备能级相匹配(图 3 给出了常见电子传输材料的导带能级<sup>[16]</sup>),提高光生电子抽取效率,同时对空穴起到有效阻挡作用。在“敏化”结构的钙钛矿太阳电池中,研究电子传输层对电池影响的报道较多。Zhong 等<sup>[17]</sup>在 FTO 上分别制备了纳米棒和纳米锥状的  $\text{TiO}_2$  材料,得出纳米棒的长短对电池性能影响较大;而纳米锥的长度对电池性能没有明显影响,且采用纳米锥时电池性能更优异,主要是因为激发电子从  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  注入到纳米锥比注入到纳米棒中所用的时间更短。Kim 等<sup>[8]</sup>采用锐钛矿的微米氧化钛阵列,制备出了光电转换效率 9.4% 的钙钛矿太阳电池。在“敏化”结构电池中,介孔的  $\text{TiO}_2$  不仅起

到传输电子的作用,还起到支撑钙钛矿光吸收层的骨架作用。Kim 等<sup>[11]</sup>采用介孔结构的  $\text{TiO}_2$  薄膜在其上面沉积  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  获得的光电转换效率达到 9.7%。Zhang 等<sup>[18]</sup>在介孔氧化钛薄膜中引入具有核壳结构的  $\text{Au@SiO}_2$  纳米粒子来增强钙钛矿的光吸收性能,制备了光电效率为 11.4% 的钙钛矿电池。

Lee 等<sup>[19]</sup>采用具有敏化结构的钙钛矿电池,把介孔  $\text{TiO}_2$  电子传输层替换为介孔结构的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜层,获得了 10.9% 的光电转换效率。对比  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  这 2 种骨架材料的电池,采用绝缘的介孔层材料反而提高电池的开路电压达到了 1.0 V,而电池的短路电流并没有明显的变化。研究发现,钙钛矿吸收层具有双性行为,既可以作为电子传输层也可以作为空穴传输层,并且指出电子在钙钛矿材料中的传输速度要大于在 n 型  $\text{TiO}_2$  层中的传输速度<sup>[1]</sup>。采用绝缘的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{ZrO}_2$ <sup>[20]</sup>作为介孔材料时,电池相当于没有电子传输层,电子直接在钙钛矿材料中进行输运,直接到达致密层  $\text{TiO}_2$  的导带被电极收集。主要原因是钙钛矿太阳电池的光吸收层  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的导带底所处的位置为 3.93 eV,而  $\text{TiO}_2$  的导带底所处的位置为 4.0 eV,有利用电子从光吸收层向致密  $\text{TiO}_2$  层传输。也有研究认为,载流子在介观的  $\text{TiO}_2$  材料和钙钛矿材料中输运速率相同,但是在介观材料中的复合速率要更大<sup>[21]</sup>。由于介孔材料主要起支撑钙钛矿光吸收层的作用,则如果把介孔材料去除后,不影响电池的性能,即形成平面异质结钙钛矿太阳电池。

除了常采用的  $\text{TiO}_2$  外,纳米 ZnO 也可以作为电子传输层,Liu 等<sup>[22]</sup>直接以 ZnO 纳米颗粒作为电子传输层在玻璃和柔性衬底上制备了效率分别为 15.7% 和 10% 的平面异质结钙钛矿太阳电池。在 p-i-n 型平面异质结构的钙钛矿太阳电池中,电子传输层主要采用的则是富勒烯的衍生物,当采用 PCBM 作为电子接受体,获得了 12% 的光电转换效率<sup>[23]</sup>。

## 2.3 空穴传输层

在钙钛矿太阳电池中,有机空穴传输材料 2,2',7,7'-四[N,N-二(4-甲氧基苯基)氨基]-9,9'-螺二芴(2,2',7,7'-tetrakis(N,N-p-dimethoxy-phenylamino)-9,9')spiro-MeOTAD 是极为昂贵的,这使得钙钛矿太阳电池的制备成本很高。为了降低成本,可以制备无空穴传输层的类 p-n 结构的钙钛矿太阳电池。Etgar 等<sup>[24]</sup>提出并首次制备了无空

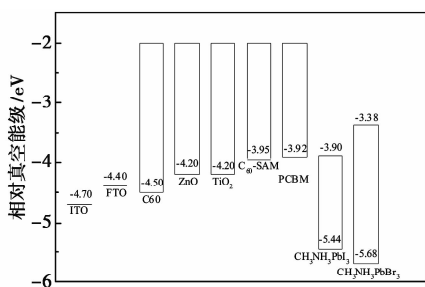


图 3 不同电子传输材料的 LUMO 或导带能级示意图

穴传输层的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$  结构的钙钛矿太阳能电池,获得 5.5% 的光电转换效率。国内,韩宏伟课题组 Mei 等<sup>[25]</sup>采用双介孔层的  $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$  作为支架层,制备了无空穴传输层的钙钛矿太阳能电池,同时采用 C 作为对电极,获得了 12.8% 的效率并且光稳定性超过 1 000 h。但是具有空穴传输层的钙钛矿电池比无空穴传输层的电池效率要高,因为空穴传输层可以起到对电子的有效阻挡作用,从而提高电池的填充因子和开路电压,因此,空穴传输层在制备高效的钙钛矿太阳能电池中是非常必要的。

空穴传输材料 HTM 可以分为有机空穴传输材料和无机空穴传输材料。在钙钛矿太阳能电池中,有机空穴传输材料主要采用的是 spiro-MeOTAD,但是由于其价格昂贵,各研究者开始研究和制备价格低廉,并且具有较强电学性能的空穴传输材料。为了降低成本,开发了  $\text{P}_3\text{HT}$ ,它是一种 3-己基噻吩的聚合物,可以作为小面积或大面积器件的空穴传输层,这种材料具有相对较高的空穴迁移率,并且在制备过程中可以采用多种技术手段,如旋转涂覆、喷雾涂布和电化学聚合等技术。Zhang 等<sup>[26]</sup>对比了电池中有无  $\text{P}_3\text{HT}$  时电池性能的差异,证实了  $\text{P}_3\text{HT}$  在钙钛矿太阳能电池中作为空穴传输层的必要性。Heo 等<sup>[27]</sup>采用新的 p 型聚合物 PTAA 以及 Kwon 和他的合作者<sup>[21]</sup>新合成了一种 PDPPDBTE 材料也可以作为全固态钙钛矿太阳能电池的 p 型空穴传输层。

无机空穴传输材料主要有 CuI、NiO 以及 CuSCN 等。Christians 等<sup>[9]</sup>采用 CuI 这种无机金属化合物作为空穴传输材料,其光电转换效率达到 6%。由于 CuI 的阻抗较高,使得电子和空穴的复合率高,导致电池的短路电流减小。Wang 等<sup>[28]</sup>采用 NiO 作为空穴传输层,用 NiO 取代  $\text{TiO}_2$  的位置得到一种反转结构,获得了 9.51% 的光电转换效率。Qin 等<sup>[29]</sup>采用 CuSCN 作为空穴传输材料获得 12.4% 的光电转换效率,主要是因为其有较高的空穴传输速率。

### 3 对电极以及稳定性

传统的对电极采用贵金属金、银等,并且电极的制备需要高真空热蒸镀,原材料价格高、制备工艺复杂。为了降低成本,华中科技大学 Ku 等<sup>[30]</sup>采用碳电极材料来替换贵金属,制备了具有全印刷技术的基于碳电极无空穴传输材料的钙钛矿电池,并且取得了较高的光电转换效率。无空穴传输层的钙钛矿太阳能电池在背接触时一般采用具有高的功函数如

Au(-5.1 eV)和 C(-5.0 eV)。采用 C 作为背接触时最好的效率为 12.8%。无空穴传输层的电池稳定性会提高,因为空穴传输层是引起电池衰退的一个重要原因。但是为什么空穴传输层能引起电池衰退的原因还不清楚。另外发现,采用  $\text{P}_3\text{HT}$  为空穴传输层的钙钛矿太阳能电池相对于没有采用  $\text{P}_3\text{HT}$  的电池在空气中存放更稳定。

### 4 结语

钙钛矿作为电池的光吸收层,存在着光响应范围不够宽,并且对水、一些溶剂材料敏感,另外材料中还含有铅等重金属元素。进一步研究无铅的钙钛矿材料是需要进一步努力的方向。钙钛矿太阳能电池的长期稳定性是需要研究的一个重要问题,主要是因为其衰退机制仍不明确,寻找化学稳定性好,对环境友好的钙钛矿材料是非常有意义的。

### 参考文献

- [1] 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: 6050 - 6051.
- [2] Im J H, Lee C R, Park J W, *et al.* 6.5% Efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell [J]. *Nanoscale*, 2011, 3: 4088.
- [3] Zhou Huanping, Chen Qi, Li Guang, *et al.* Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells [J]. *Science*, 2014, 345: 542 - 546.
- [4] Zhou Y, Zhang W H, Organolead halide perovskite: A rising player in high-efficiency solar cells [J]. *Chinese J Catal*, 2014, 35: 983 - 988.
- [5] Stranks S D, Eperon G E, Grancini G, *et al.* Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber [J]. *Science*, 2013, 342: 341 - 343.
- [6] Burschka J, Pellet N, Moon S J, *et al.* Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells [J]. *Nature*, 2013, 499: 316 - 319.
- [7] Liu M Z, Johnston M B, Snaith H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition [J]. *Nature*, 2013, 501: 395 - 398.
- [8] Kim H S, Lee J W, Yantara N, *et al.* High efficiency solid-state sensitized cell-based on submicrometer rutile  $\text{TiO}_2$  nanorod and  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite [J]. *Nano Lett*, 2013, 13: 2412 - 2417.
- [9] Christians J A, Fung R C, Kamat P V. An inorganic hole conductor for organo-lead halide perovskite solar cells improved hole conductivity with copper iodide [J]. *J Am Chem Soc*, 2014, 136: 758 - 764.
- [10] Chen Q, Zhou H, Hong Z, *et al.* Planar heterojunction perovskite solar cells via vapor-assisted solution process [J]. *J Am Chem Soc*,

- 2014,136(2):622-625.
- [11] Kim H S, Lee C R, Im J H, *et al.* Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9% [J]. *Sci Rep*, 2012, 2:591.
- [12] Im J H, Kim H S, Park N G. Morphology-photovoltaic property correlation in perovskite solar cells: One-step versus two-step deposition of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  [J]. *APL Materials*, 2014, 2:081510.
- [13] Xing G C, Nripan M, Sun S Y, *et al.* Long-range balanced electron- and hole-transport lengths in organic-inorganic  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  [J]. *Science*, 2013, 342:344-347.
- [14] Stoumpos C C, Malliakas C D, Kanatzidis M G. Semiconducting tin and lead perovskites with organic cations: Phase transitions, high mobilities, and near-infrared photoluminescent properties [J]. *Inorg Chem*, 2013, 52(15):9019-9038.
- [15] Zuo F, Williams S T, Liang P W, *et al.* Binary-metal perovskites toward high-performance planar-heterojunction hybrid solar cells [J]. *Adv Mater*, 2014, 26:6454-6460.
- [16] 丁雄桀, 倪露, 马圣博, 等. 钙钛矿太阳能电池中电子传输材料的研究进展 [J]. *物理学报*, 2015, 64(3):038802.
- [17] Zhong D, Cai B, Wang X, *et al.* Synthesis of oriented  $\text{TiO}_2$  nanorods with fast charge transfer for perovskite solar cells [J]. *Rapid Communication*, 2015, 11:409-418.
- [18] Zhang W, Saliba M, Stranks S D, *et al.* Enhancement of perovskite-based solar cells employing core-shell metal nanoparticles [J]. *Nano Lett*, 2013, 13:4505-4510.
- [19] Lee M M, Teuscher J, Miyasaka T, *et al.* Efficient hybrid solar cells based on meso-structured organometal halide perovskites [J]. *Science*, 2012, 338:643-647.
- [20] Kim H S, Mora-Sero I, Gonzalez-Pedro V, *et al.* Mechanism of carrier accumulation in perovskite thin-absorber solar cells [J]. *Nat Commun*, 2013, DOI:10.1038/ncomms3242.
- [21] Kwon Y S, Lim J C, Yun H J, *et al.* A diketopyrrolopyrrole-containing hole transporting conjugated polymer for use in efficient stable organic-inorganic hybrid solar cells based on a perovskite [J]. *Energy Environmental Science*, 2014, 7:1454-1460.
- [22] Liu D, Kelly T L. Perovskite solar cells with a planar heterojunction structure prepared using room-temperature solution processing techniques [J]. *Nat Photonics*, 2014, 8:133-138.
- [23] Malinkiewicz O, Yella A, Lee Y H, *et al.* Perovskite solar cells employing organic charge-transport layers [J]. *Nat Photonics*, 2014, 8:128-132.
- [24] Etgar L, Gao P, Xue Z S, *et al.* Mesoscopic  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$  heterojunction solar cells [J]. *J Am Chem Soc*, 2012, 134:17396-17399.
- [25] Mei A, Li X, Liu L, *et al.* A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability [J]. *Science*, 2014, 345:295-298.
- [26] Zhang Y, Liu W, Tan F, *et al.* The essential role of the poly(3-hexylthiophene) hole transport layer in perovskite solar cells [J]. *J Power Sources*, 2015, 274:1224-1230.
- [27] Heo J H, Im S H, Noh J H, *et al.* Efficient inorganic-organic hybrid heterojunction solar cells containing perovskite compound and polymeric hole conductors [J]. *Nat Photonics*, 2013, 7:486-491.
- [28] Wang K C, Jeng J Y, Shen P S, *et al.* P-Type mesoscopic nickel oxide/organometallic perovskite heterojunction solar cells [J]. *Sci Rep*, 2014, DOI:10.1038/srep04756.
- [29] Qin P, Tanaka S, Ito S, *et al.* Inorganic hole conductor-based lead halide perovskite solar cells with 12.4% conversion efficiency [J]. *Nat Commun*, 2014, DOI:10.1038/ncomms4834.
- [30] Ku Z, Rong Y, Xu M, *et al.* Full printable processed mesoscopic  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$  heterojunction solar cells with carbon counter electrode [J]. *Sci Rep*, 2013, DOI:10.1038/srep03132. ■

## 沙特基础工业公司、神华宁夏煤业集团公司与宁夏回族自治区 就组建合资企业达成合作意向

2016年8月31日,沙特基础工业公司(SABIC)、神华宁夏煤业集团公司与中国宁夏回族自治区政府就进一步推进合资企业的建设达成原则性一致意见,有望合资建设一座煤化工综合工厂。该工厂将通过聚合物及其衍生产品来服务于高分化应用领域,该项目将落户宁夏回族自治区。根据协议,宁夏政府承诺将为项目提供支持和鼓励,同时该协议也为三方搭建了就项目审批进行协调、合作的框架。该项协议的签署,正值沙特阿拉伯王国副皇储穆罕默德·本·萨勒曼殿下率高层代表团访华。应邀前来中国参加20国集团(G20)峰会的沙特阿拉伯王国能源、工业和矿产资源部部长哈利德·法力赫(Khalid Al-Falih)阁下、沙特商务

与投资部部长马基德·卡萨比博士(Majid Al-Qasabi)及其他一些部长也共同见证了该项协议的签署。

SABIC遍布全球的技术和创新中心会针对产品开发、技术支持和应用提供支持,此外SABIC强大的全球营销网络 and 客户服务能力也将多有助益。该项目同时还可以得到神华宁夏煤业集团的助力。神华宁夏煤业集团是神华集团的附属公司,其不仅是中国最大的煤炭生产商和供应商之一,同时也是一家业务遍布全球,基于煤炭业务的综合性能源及化学品公司。宁夏回族自治区是中国最大的煤炭产地之一,因此该项目不但可以坐拥区位优势,而且能享受到宁夏政府提供的鼓励措施及支持。(戴秋芸)