2017 年我国光伏技术发展报告 (6)

■ 中国可再生能源学会光伏专业委员会

北京大学朱瑞课题组使用溶液法制备 Cs_2CO_3 作为电子传输层代替 TiO_2，电池效率超过 15%[117]；通过优化两步法制备多孔的 PbI_2 膜层，从而促进 PbI_2 和 MAI 的反应，提高钙钛矿层的质量，基于该方法得到的电池效率为 15.7%[118]；在 p-i-n 结构中，通过采用醋酸铅作为钙钛矿太阳电池的铅源，同时适量添加 MABr 作为添加剂，得到了高质量的钙钛矿薄膜，基于该薄膜的电池效率超过 18%[119]。Chen 等 [120] 采取了一种界面修饰的方法来提高平面结构钙钛矿太阳电池的电荷载流子平衡，这种方法能够提高空穴传输层的电导能力，同时可改善薄膜平整性，有利于增强界面接触及电荷载流子的收集。基于上述电荷载流子平衡的理念，实现了反式平面结构中 18.72% 的光电转换效率，无扫描迟滞，且稳态输出效率达到 17.70%。此外，Liu 等 [121] 基于反式钙钛矿太阳电池的发展状况，针对反式钙钛矿太阳电池中的界面材料、活性层形貌、器件稳定性、迟滞效应等课题的研究情况进行了系统的整理和总结，对基于反式结构的柔性钙钛矿太阳电池和半透明钙钛矿太阳电池的研究进展也进行了总结探讨。

华中科技大学的 Zhang Hua 课题组发现了一种廉价、稳定、高效的全无机氧化物界面层钙钛矿太阳电池。其利用高导电、能级匹配和高化学稳定性的 p 型 $CuGaO_2$ 纳米片作为空穴传输层，构成“TiO_2/ 钙钛矿 /$CuGaO_2$”的 n-i-p 型平面结构电池，取得了高达 18.51% 的光电转换效率，稳定性相比有机空穴传输层 Spiro-OMeTAD 有显著提升，在室内环境中存放 30 天仍保持了初始值的 90% 以上的效率 [122]。

武汉大学方国家课题组通过低温 (95 ℃) 水热方法制备出一种纳米多级结构二氧化锡电子传输层，并应用到钙钛矿太阳电池中，以提高电池的稳定性。基于这种低温水热方法生长的 SnO_2，钙钛矿太阳电池的光电转换效率可达 16.17%，在低湿度、无封装、室温条件下放置 3000 h 后，其效率衰减不超过 10%[123]。另外，从分子设计层面出发，用八甲基取代的酞菁铜 ($CuMe_2Pc$) 代替 Spiro 作为空穴传输层，取得了 15.75% 的光电转换效率和优异的长期稳定性；经过 2000 h 的长期稳定性测试后，电池还能保持初始效率的 95%[124]。通过在钙钛矿的前驱体中加入少量的 $Pb(SCN)_2$，整合了富勒烯钝化的 SnO_2 电子传输层和经过晶界钝化的钙钛矿吸光层，使得平面钙钛矿太阳电池的效率高达 19.45%[125]。

为了提高钙钛矿太阳电池的防水性能和热稳定性，武汉大学赵兴中课题组对电池结构进行了改良，通过采用无空穴传输层材料的电池结构及由 C/CH_3NH_3I 复合层和疏水性碳层组成的双分子层结构，得到具有良好热稳定性且一定程度

2019-1印刷.indd 29 2019-1-23 9:44:34

上达到防水效果的钙钛矿太阳电池。经优化的电池在热处理之前效率达到 11.3%，热处理之后效率提高至 13.6%，并且经过简易封装进行防水测试仍能保持初始效率的 90%[126]。采用由二氧化钛纳米阵列和纳米粒子组成的复合层作为无空穴传输层钙钛矿电池的电子传输层来提高其电荷传输性能，并降低电荷在该层的复合。经优化的无空穴传输材料钙钛矿太阳电池光电转换效率达到 13.5%[127]；选择在多孔二氧化钛层旋涂 1 层二氧化硅作为绝缘层，可有效抑制电荷在二氧化钛层与碳电极之间的复合，从而提高电池的开路电压。经优化的电池的光电转换效率达到约 12% [128]。通过将多壁碳纳米管嵌入钙钛矿层，既可以将其作为钙钛矿晶体之间电荷传输的高速通道，又可以促进碳电极的光生空穴的收集；经优化的电池的平均光电转换效率达到 11.6%[129]。通过在两步法制备钙钛矿的过程中对 PbI_2 层进行溶剂处理来实现对其形貌的控制。通过对不同溶剂处理后 PbI_2 层的形貌及电池性能进行比较，最终得到经由乙醇处理后的 PbI_2 层组成的电池，其光电转换效率达到 11.22%[130]。使用商业化 P25 纳米颗粒来形成二氧化钛电子传输层，并对该层膜厚及孔隙度进行调节优化，最终得到光电转换效率达到 12.48% 的无空穴传输层的钙钛矿太阳电池 [131]。

清华大学林红课题组和清华大学富士康纳米中心合作，采用超顺排交叉碳纳米管作为电极材料，开发了一种无空穴传输层的钙钛矿太阳电池结构 FTO/TiO_2-perovskite/Al_2O_3-perovskite/CSCNT-perovskite/PMMA，最终取得了 10.54% 的电池效率。另外，在 PMMA 的包覆下，在暗态、温度 45 ℃、湿度 75% 的条件下，电池在 1500 h 测试后，效率维持在最初的 93% 以上；在光照下，湿度 40%、温度 20 ℃时，电池在 400 h 测试后效率仍可维持在最初的 87% 以上 [132]。使用旋涂法在正结构钙钛矿太阳电池的空穴传输层 Spiro-OMeTAD 上制备透明纳米银线电极，在纳米银线和 Spiro-OMeTAD 层之间插入了一层超薄的金层 (~ 6 nm)；基于此技术制备的半透明钙钛矿太阳电池实现了从 FTO 端照射 11.07%、从纳米银线端照射 7.53% 的电池效率，展现了其在柔性器件及在钙钛矿叠层电池中应用的巨大潜力，同时也为钙钛矿太阳电池中电极的选择和长期稳定性的研究提供了参照 [131-133]。

中国科技大学杨上峰课题组提出了一种利用富勒烯衍生物双重表面修饰的新方法，通过对 TiO_2 电子传输层进行双重表面修饰，成功解决了在富勒烯衍生物上旋涂 PbI_2 时浸润性差的问题，并将电池器件的平均效率从 13.00% 提高到了 16.31%，而最高效率可达到 18.49%，为目前报道的基于富勒烯修饰的 TiO_2 电子传输层的正向结构钙钛矿太阳电池的最高效率；同时，器件的效率迟滞现象也得到了明显改善 [134]。利用离子液体 1- 乙基 -3- 甲基咪唑六氟磷酸盐 (1-ethyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate，[EMIM]PF_6) 修饰 TiO_2 电子传输层，获得的正向结构钙钛矿太阳电池的最高效率达到了 19.59%。此外，还利用 [EMIM]PF_6 离子液体替代 TiO_2 直接应用于正向结构钙钛矿太阳电池的电子传输层，得到的电池器件的最高效率为 14.39%[135]。通过在第二步所用的 CH_3NH_3I 的异丙醇溶液中掺杂少量 (10 wt%) 醋酸盐 (醋酸铵或醋酸钠)，成功将钙钛矿太阳电池的效率从 13.63% 提高到 16.03%[136]。

中国科学院化学研究所胡劲松研究员和万立骏院士发展了一种利用空间限域作用制备大面积高质量的有机无机杂化 $MAPbX_3$(X=Cl、Br、I) 钙钛矿单晶薄膜的溶液法。该方法制备的单晶薄膜表面平整光滑无晶粒结构，具有较高的晶体质量，并且由于单晶薄膜的表面缺陷相比多晶薄膜有大幅降低，因此薄膜的空气稳定性也有极大提高；并通过同步辐射、衍射等一系列的表征方法，证明了该方法制备的单晶薄膜具有很高的晶体质量和与体相单晶相似的光电性能，为进一步制备和研究钙钛矿单晶太阳电池及其他单晶器件开辟

2019-1印刷.indd 30 2019-1-23 9:44:34

了新的途径[137]。

大连理工大学孙立成课题组合成了一种新型的空穴传输材料 X60，基于该材料的钙钛矿太阳电池效率高达 19.84%[138]。北京大学卞祖强课题组采用 CuO_x 作为空穴传输材料代替 PEDOT:PSS，基于掺 Cl 的钙钛矿材料，制备出效率为 19.0% 的高效 p-i-n 型钙钛矿太阳电池[139]。上海交通大学赵一新课题组以 $CH_3NH_3PbI_{3-x}Br_x$ 作为钙钛矿材料，通过奥斯瓦尔德熟化过程制备出效率高达 19.12% 的钙钛矿太阳电池[140]。中国科学院半导体所的游经碧课题组采用 SnO_2 作为电子传输层代替经典的 TiO_2，基于 $(FAPbI_3)_{0.97}(MAPbBr_3)_{0.03}$ 材料，制备出了效率超过 20% 的钙钛矿太阳电池[141]。中国科学院广州能源研究所徐雪青课题组采用大气环境下热基底喷涂的方法 (基底温度约 120 ℃) 成功制备出大晶粒、结构致密的钙钛矿薄膜，制备的电池光电转换效率达 13.54%[142]，是目前为止在高湿度条件下 (50% 以上) 采用喷涂法制备甲基胺碘化铅钙钛矿太阳电池的最高纪录。

南开大学光电子所采用溅射法制备了致密 TiO_2 电子传输层，并将其应用到 n-i-p 平面型钙钛矿太阳电池中，通过调节溅射时间来控制该电子层的厚度。通过优化 TiO_2 电子传输层的厚度，将器件的转换效率从 9.20% 提高到 14.23%。面积为 1 cm^2 的低温 n-i-p 平面型钙钛矿单结太阳电池的认证效率达到了 12.97%，面积为 0.1 cm^2 的电池的认证效率达 15.01%。通过引入 PCBM 界面缓冲层，进一步提高了电池的转换效率，平面型钙钛矿太阳电池的效率超过了 17%[143]。基于低温的 n-i-p 平面型钙钛矿太阳电池率先构建了钙钛矿 / 硅异质结叠层太阳电池，效率达到 14.52%。

此外，华北电力大学戴松元课题组在钙钛矿太阳电池材料模拟计算、低温制备钙钛矿材料和高效电池器件方面取得了重要的成果，电池效率超过了 19.62%；苏州大学廖良生课题组在钙钛矿界面工程及钙钛矿晶体生长等方面有较多出色的工作；中国科学院物理所孟庆波课题组对于无空穴传输结构的钙钛矿太阳电池及电池的机理有较为深入的研究。中国科学院合肥物质科学研究院课题组在高效稳定性混合维钙钛矿材料和器件研究、高温快速制备钙钛矿及小分子有机空穴传输材料结构设计及对器件性能影响方面做了一定的研究工作。

在无铅 / 少铅钙钛矿研究方面，王立铎教授团队制备了物相稳定的 $CsSnIBr_2$ 无机无铅钙钛矿薄膜。在 473 K 条件下对器件进行持续效率输出测试，经过 9 h 后，效率衰减仅为 2%。通过优化制备工艺，器件的稳定化输出效率达到 3%[144]。麦耀华团队利用 DMSO 溶剂分子将 PbI_2、SnI_2 和 CH_3NH_3I 键连起来，通过分子内交换，实现了制备大晶粒、高致密的无铅 / 少铅钙钛矿薄膜，并取得了 14.12% 的转换效率[145]。

4.3.2 染料敏化太阳电池

染料敏化太阳电池研究方面：中国科学院合肥物质科学研究院发明了多种单分散 TiO_2 微米球的合成方法并应用于电池上，合成的微米球具有吸附能力强、光散射性能好、电子复合率低等优点，制备的电池的效率经国家光伏产品质量监督检验中心检测，达到了 11.63%[146]。同时，课题组在基于新型电子给体天线的钌基配合物染料、基于海因受体的 D-A-π-A 型有机染料的设计合成方面做了出色的研究工作[147-148]。染料敏化太阳电池的产业化研究也获得了一定进步，中国科学院上海硅酸盐研究所建成了 MW 级染料敏化太阳电池生产线，标准化 12.5 cm×12.5 cm 单电池，认证效率达到 9.7%，组件认证效率达到了 9.2%[149]。

中国科学院化学所的研究人员发展了一系列基于噻吩取代苯并二噻吩 (BDTT) 与苯并三氮唑 (BTA) 单元的中间带隙二维共轭 D-A 共聚物给体材料，并利用这类聚合物在可见－近红外区与 n 型聚合物受体 N2200 和有机半导体受体

2019-1印刷.indd 31 2019-1-23 9:44:34

ITIC 吸收互补的特点，分别制备了氟取代聚合物 J51 为给体，H2200 或 ITIC 为受体的非富勒烯聚合物太阳电池。使用 N2200 受体的全聚合物太阳电池能量转换效率 (PCE) 达到 8.27%[150]，为全聚合物太阳电池效率的文献报道最高值；使用 ITIC 的非富勒烯聚合物太阳电池的 *PCE* 达到了 9.26%[151]。随后，他们根据烷硫基取代可以降低共轭聚合物 HOMO 能级的经验，将硫烷基引入到 BDTT 单元的噻吩共轭侧链上，进一步降低了聚合物的 HOMO 能级，同时还使其吸收光谱红移。另外，他们还发现所得聚合物 J61 更有利于采取平行于衬底方向的分子排列，这些因素都有利于提升光伏性能。基于 J61 与 ITIC 的器件的开路电压 (V_{oc}) 和 *PCE* 分别提高到约 0.9 V 和 9.52%[152]，通过进一步优化，使其效率达到了 10.57%[153]。研究人员进一步在聚合物的 BDTT 单元噻吩共轭侧链上引入硅烷基来调制聚合物的电子结构和光伏性能，发现所得到的聚合物 J71 具有更低的 HOMO 能级。另外，较长的 C-Si 键也让硅原子上的三取代烷基链距离主链更远，增加了分子的有序堆积和聚合物的结晶性。采用 J71 与 ITIC 共混制备的非富勒烯聚合物太阳电池的 V_{oc} 进一步提升至 0.94 V，器件效率达到 11.41%[154]。另外，他们通过将 ITIC 侧链苯环上的柔性链从对位移到间位，使得到的 m-ITIC 的电子迁移率显著提高，从而进一步提升了非富勒烯聚合物太阳电池的发电性能；基于 J61 为给体、m-ITIC 为受体的非富勒烯聚合物太阳电池的 *PCE* 达到了 11.77%[155]。化学所侯剑辉研究组通过小分子受体的端基优化，将非富勒烯聚合物太阳电池的效率提高到超过 12%[156]，为单结聚合物太阳电池的最高效率。

薄志山课题组将 $PC_{71}BM$ 加入 PPBDTBT:ITIC 中，降低了 ITIC 在薄膜中聚集，有利于载流子传输；$PC_{71}BM$ 的加入也增强了电池吸收光子的能力，最终优化添加比例之后的器件的光电转换效率超过 10%[157]。孙艳明研究小组使用 2 种非富勒烯受体制备三元太阳电池，由于第 2 种受体的加入，使得电池的吸收光子能力得到增强，并且降低了材料的聚集，同时保留了顺畅的载流子传输通道，最终器件的光电转换效率超过 10%[158]。

中国科技大学杨上峰课题组利用溶剂热法成功制备出在邻二氯苯溶剂中分散性良好的 $g\text{-}C_3N_4$ 量子点，然后将其掺杂于体相异质结聚合物太阳电池的活性层中，发现其对电池的能量转换效率有显著提升，在不同活性层 PTB7-Th:$PC_{71}BM$、PBDTTT-C:$PC_{71}BM$ 和 P_3HT:$PC_{61}BM$ 体系中，电池效率分别为 9.18%、6.36% 和 4.23%，相比于未掺杂的体系分别提升了 11.8%、11.6% 和 17.5%[159]。通过简单的一锅法，利用亲核加成反应合成了一种新型的乙醇胺修饰的富勒烯衍生物 C_{60}-ETA；以 C_{60}-ETA 作为电子传输层取代传统的 ZnO，在不同活性层 PTB7-Th:$PC_{71}BM$、PBDTTT-C:$PC_{71}BM$ 和 P_3HT:$PC_{61}BM$ 体系中，电池效率分别为 9.55%、6.50% 和 4.18%，均高于基于传统的 ZnO 电子传输层的体系，为开发聚合物太阳电池的新型电子传输材料提供了新的思路 [160]。

华东理工大学钟新华课题组基于增加活性位点提高对电极催化活性的新思路，发展出网状基底限域锚定新策略，通过提高碳材料膜的厚度及改善电解质在碳膜内的传质来增加有效活性位点，发明了高催化活性的钛网负载介孔碳 (MC/Ti) 对电极。与传统的 Cu_2S/FTO 对电极比较，基于 MC/Ti 对电极组装出的 ZnSe-$CuInSe_2$ (ZCISe) QDSC 的填充因子提高了 15% (0.544 vs 0.627)，光电压提高了 110 mV (0.635 V vs 0.745 V)。由于所用 MC/Ti 对电极高的电催化活性及导电性，结合 ZCISe 合金量子点光捕获材料具有的优异光电性能 (吸光范围拓宽至~ 1000 nm，合金结构所决定的高电子注入速率及低的电荷复合动力学)，构建出的 QDSC 取得了 11.61% 的转换效率，并经过了国家光伏质检中心的认证。这一结果为所有类型量子点太阳电池 (包括敏化构型及异质结

2019-1印刷.indd 32 2019-1-23 9:44:35

构型) 的最高性能，同时也将 QDSC 光伏性能第一次提升到了与同类型染料敏化太阳电池相同的水平 [161]。

4.3.3 量子点太阳电池

中国科学院合肥物质科学研究院朱俊课题组与华北电力大学戴松元课题组合作，提出了一种无磷一锅法合成绿色环境友好的铜基量子点。采用油胺 / 十二硫醇混合溶剂溶解硒粉，获得了绿色无毒的硒反应源，可方便地通过调节溶剂十二硫醇的量获得尺寸在 2～10 nm 之间可调、尺寸单分散的铜铟锡量子点，吸收边可达到 850 nm，且可充分利用太阳光谱中直到近红外光谱部分。该合成过程中另一个显著的优点是可以实现规模化制备且产率达到了 96% 以上。将该量子点初步应用在量子点太阳电池中，光电转换效率达到 5%，展现了良好的光电应用前景 [162]。(待续)

参考文献

[117] 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.

[118] Liu T H, Hu Q, Wu J, et al. Mesoporous PbI_2 scaffold for high performance planar heterojunction perovskite solar cells[J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(3): 1501890.

[119] Zhao L, Luo D Y, Wu J, et al. High-performance inverted planar heterojunction perovskite solar cells based on lead acetate precursor with efficiency exceeding 18%[J]. Advanced Functional Materials,2016, 26(20): 3508 − 3514.

[120] Chen K, Hu Q, Liu T H, et al. Charge-carrier balance for highly efficient inverted planar heterojunction perovskite solar cells[J]. Advanced Materials, 2016, 28(48): 10718 − 10724.

[121] Liu T, Chen K, Hu Q, et al. Inverted perovskite solar cells: progresses and perspectives[J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(17): 1600457.

[122] Zhang H, Wang H, Chen W, et al. $CuGaO_2$: A promising inorganic hole-transporting material for highly efficient and stable perovskite solar cells[J]. Advanced Materials, 2017, 29(8): 1604984.

[123] Fang G J, et al. Enhanced stability of perovskite solar cells with low-temperature hydrothermally grown SnO_2 electron transport layers[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26: 6069 − 6075.

[124] Yang G, Wang Y L, Xu J J, et al. A facile molecularly engineered copper (II) phthalocyanine as hole transport material for planar perovskite solar cells with enhanced performance and stability[J]. Nano Energy, 2017, 31: 322 − 330.

[125] Ke W J, Xiao C X, Wang C L, et al. Employing lead thiocyanate additive to reduce the hysteresis and boost the fill factor of planar perovskite solar cells[J]. Advanced Materials, 2016, 28(26): 5214 − 5221.

[126] Yu Z H, Chen B L, Liu P, et al. Stable organic-inorganic perovskite solar cells without hole-conductor layer achieved via cell structure design and contact engineering[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(27): 4866 − 4873.

[127] Yu Z H, Qi F, Liu P, et al. A composite nanostructured electron-transport layer for stable hole-conductor free perovskite solar cells: Design and Characterization[J]. Nanoscale, 2016, 8(11): 5847 − 5851.

[128] Cheng N, Liu P, Bai S H, et al. Enhanced performance in hole transport material free perovskite solar cells via morphology control of PbI_2 film by solvent treatment[J]. Journal of Power Sources, 2016, 319: 111 − 115.

[129] Cheng N, Liu P, Bai S H, et al. Application of mesoporous SiO_2 layer as an insulating layer in high performance hole transport material free $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cells[J]. Journal of Power Sources, 2016, 321: 71 − 75.

[130] Cheng N, Liu P, Qi F, et al. Multi-walled carbon nanotubes act as charge transport channel to boost the efficiency of hole transport material free perovskite solar cells[J]. Journal of Power Sources, 2016, 332: 24 − 29.

[131] Liu P, Yu Z H, Cheng N, et al. Low-cost and efficient hole-transport-material-free perovskite solar cells employing controllable electron-transport layer based on P25 nanoparticles[J]. Electrochimica Acta, 2016, 213: 83 − 88.

[132] Luo Q, Ma H, Zhang Y, et al. Cross-stacked superaligned carbon nanotube electrodes for efficient hole conductor-free perovskite solar cells[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(15): 5569 − 5577.

[133] Dai X Z, Zhang Y, Shen H P, et al. Working from both sides: composite metallic semitransparent top electrode for high performance perovskite solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(7): 4523 − 4531.

[134] Zhou W R, Zhen J M, Liu Q, et al. Successive surface engineering of TiO_2 compact layer via dual modification of fullerene derivatives affording hysteresis-suppressed high-performance perovskite solar cells[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017,5(4): 1724 − 1733.

[135] Wu Q L, Zhou W R, Liu Q, et al. Solution-processable ionic liquid as an independent or modifying electron transport layer for high-efficiency perovskite solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(50): 34464-34473.

[136] Wu Q L, Zhou P C, Zhou W R, et al. Acetate salts as non-halogen additives to improve perovskite film morphology for high-efficiency solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,

2019-1印刷.indd 33 2019-1-23 9:44:35

2016, 8(24): 15333 − 15340.
[137] Chen Y X, Ge Q Q, Shi Y, et al. General space-confined on-substrate fabrication of thickness-adjustable hybrid perovskite single-crystalline thin films[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(50): 16196 − 16199.
[138] Xu B, Bi D Q, Hua Y, et al. A low-cost spiro[fluorene-9,9′ -xanthene]-based hole transport material for highly efficient solid-state dye-sensitized solar cells and perovskite solar cells[J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(3): 873 − 877.
[139] Rao H X, Ye S Y, Sun W H, et al. A 19.0% efficiency achieved in CuO_x-based inverted $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$ solar cells by an effective Cl doping method[J]. Nano Energy, 2016, 27: 51 − 57.
[140] Yang M J, Zhang T Y, Schulz P, et al. Facile fabrication of large-grain $CH_3NH_3PbI_{3-x}Br_x$ films for high-efficiency solar cells via CH_3NH_3Br-selective Ostwald ripening[J]. nature communications, 2016, 7: 12305.
[141] Jiang Q, Zhang L Q, Wang H L, et al. Enhanced electron extraction using SnO_2 for high-efficiency planar-structure $HC(NH_2)_2PbI_3$-based perovskite solar cells[J]. nature energy, 2016, 2: 16177.
[142] Bi Z N, Liang Z R, Xu X Q, et al. Fast preparation of uniform large grain size perovskite thin film in air condition via spray deposition method for high efficient planar solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2017, 162: 13 − 20.
[143] Fan L, Ding Y, Shi B, et al. Novel insight into the function of pc61bm in efficient planar perovskite solar cells[J]. Nano Energy, 2016, 27: 561 − 568.
[144] Li W Z, Li J W, Li J L, et al. Addictive-assisted construction of all-inorganic $CsSnIBr_2$ mesoscopic perovskite solar cells with superior thermal stability up to 473 K[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4: 17104 − 17110.
[145] liu C, Fan J D, Li H L, et al. Highly efficient perovskite solar cells with substantial reduction of lead content[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35705.
[146] Huang Y, Zhu J, Ding Y, et al. TiO_2 sub-microsphere film as scaffold layer for efficient perovskite solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(12): 8162 − 8167.
[147] Chen W C, Kong F T, Li Z Q, et al. Superior light-harvesting heteroleptic ruthenium(II) complexes with electron-donating antennas for high performance dye-sensitized solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(30): 19410 − 19417.
[148] Guo F L, Li Z Q, Liu X P, et al. Metal free sensitizers containing hydantoin acceptor as high performance anchoring group for dye sensitized solar cells[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(31): 5733 − 5740.
[149] 科学网 [EB/OL]. http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/8/354251. shtm, 2017-05-01.
[150] Gao L, Zhang Z G, Xue L, et al. All-polymer solar cells based on absorption-complementary polymer donor and acceptor with high power conversion efficiency of 8.27%[J]. Advanced Materials, 2016, 28(9): 1884 − 1890.
[151] Gao L, Zhang Z G, Bin H, et al. High efficiency non-fullerene polymer solar cells with medium bandgap polymer donor and narrow bandgap organic semiconductor acceptor[J]. Advanced Materials, 2016, 28(37): 8288 − 8295.
[152] Bin H, Zhang Z G, Gao L, et al. Non-fullerene polymer solar cells based on alkylthio and fluorine substituted 2D-conjugated polymers reach 9.5% efficiency[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(13): 4657 − 4664.
[153] Yang Y, Zhang Z G, Bin H, et al. Side-chain isomerization on n-type organic semiconductor ITIC acceptor make 11.77% high efficiency polymer solar Cells[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(45): 15011 − 15018.
[154] Bin H, Gao L, Zhang Z G, et al. 11.4% efficiency non-fullerene polymer solar cells with trialkylsilyl substituted 2D-conjugated polymer as donor[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13651.
[155] Yang Y, Zhang Z G, Bin H, et al. Side-chain isomerization on n-type organic semiconductor ITIC acceptor make 11.77% high efficiency polymer solar cells[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(45): 15011 − 15018.
[156] Li S S, Ye L, Zhao W C, et al. Energy-level modulation of small-molecule electron acceptors to achieve over 12% efficiency in polymer solar cells[J]. Advanced Materials, 2016, 28: 9423 − 9429.
[157] Lu H, Zhang J C, Chen J Y, et al. Ternary-blend polymer solar cells combining fullerene and nonfullerene acceptors to synergistically boost the photovoltaic performance[J]. Advanced Materials, 2016, 28(43): 9559 − 9566.
[158] Liu T, Guo Y, Yi Y P, et al. Ternary organic solar cells based on two compatible nonfullerene acceptors with power conversion efficiency 10%[J]. Advanced Materials, 2016, 28(45): 10008 − 10015.
[159] Chen X, Liu Q, Wu Q L, et al. Incorporating graphitic carbon nitride (g-C3N4) quantum dots into bulk-heterojunction polymer solar cells leads to efficiency enhancement[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26: 1719 − 1728.
[160] Zhen J M, Liu Q, Chen X, et al. An ethanolamine-functionalized fullerene as an efficient electron transport layer for high-efficiency inverted polymer solar cells[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4: 8072 − 8079.
[161] Du J, Du Z L, Hu J S, et al. Zn-Cu-In-Se quantum dot solar cells with a certified power conversion efficiency of 11.6%[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(12): 4201 − 4209.
[162] Liu F, Zhu J, Xu Y, et al. Scalable noninjection phosphine-free synthesis and optical properties of tetragonal-phase $CuInSe_2$ quantum dots[J]. Nanoscale, 2016, 8(19): 10021 − 10025. 太阳能

2019-1印刷.indd 34 2019-1-23 9:44:35