

具有接近15%能量转换效率的有机太阳能电池*

崔勇 姚惠峰 杨晨熠 张少青 侯剑辉**

(中国科学院化学研究所 高分子物理与化学国家重点实验室 北京 100190)

摘要 对叠层有机太阳能电池中的前、后子电池之间的光谱匹配性进行了优化调制. 最终, 选用带隙为1.24 eV的PTB7-Th:IEICO-4F作为后电池, 带隙为1.59 eV的J52-2F:IT-M作为前电池制备了叠层电池. 在这个叠层有机太阳能电池中, 这两个子电池不仅具有互补的吸收光谱, 还具有高的外量子效率, 实现了对300 ~ 1000 nm范围内太阳发射光谱的高效利用. 此外, 前、后电池的能量损失均得到有效的控制, 分别为0.64和0.53 eV. 因此, 从光伏性能具体参数上来看, 本文制备的叠层器件兼具了高短路电流密度(J_{sc})和高开路电压(V_{oc})的优势, 分别达到13.3 mA/cm²和1.65 V. 该电池在本实验室内部测试的光伏效率高达14.9%, 封装之后效率略有降低, 由中国计量科学研究院(NIM)验证的光伏效率达到14.0%. 这是目前有机光伏领域的国际最高结果.

关键词 有机太阳能电池, 聚合物太阳能电池, 非富勒烯, 叠层器件, 能量转换效率

有机太阳能电池(OSCs)由于质量轻、成本低、柔性以及可大面积卷对卷印刷等优点在清洁能源领域受到广泛关注^[1-5]. 近些年, 随着新型有机光伏材料的不断发展和器件的优化, 单节有机太阳能电池的能量转化效率(PCE)已经超过13%^[6]. 尽管这一结果在OSCs领域令人振奋, 但是单节电池始终面临着2个挑战. 一方面是给受体材料吸收光谱窄, 活性层不能充分利用太阳光. 另一方面是当光子激发活性层材料电子跃迁时, 光子能量大于活性层材料的光学带隙会导致热能损失. 这2个因素严重地限制了单节电池能量转化效率.

制备叠层电池是克服以上问题的一种有效方法^[7-12]. 与单节电池相比, 叠层电池通过堆叠光谱互补的子电池实现对太阳光谱更加充分的利用. 这一点对于提升外量子效率具有重要价值. 同时, 叠层电池中宽带隙的子电池俘获高能的光子输出高的 V_{oc} , 窄带隙的子电池能够俘获低能光子, 提供与宽带隙子电池相匹配的 J_{sc} , 因此实现了对高能量和低能量光子的分别利用. 这一

点对于降低热损失具有重要价值. 因此, 对于各种类型的光伏电池而言, 构筑叠层结构的器件是有效提升光伏性能的最佳途径. 需要指出的是, 尽管叠层电池在提升光伏效率方面具有突出优势, 但是由于其涉及材料种类多^[13-15]、电池制备难度大, 高效率叠层电池仍然是有机光伏领域的重要挑战.

一个理想的叠层电池应该有尽可能高的开路电压和短路电流密度. 然而, 在过去的数十年中, 以富勒烯为受体的器件在有机太阳能电池中占据着主导地位. 其光吸收特性的局限和器件高能量损失的缺点限制了叠层有机太阳能电池效率的提升. 最近, 得益于非富勒烯受体快速发展, 器件的能量损失可以降到0.6 eV甚至更低^[16-18]. 另一方面, 非富勒烯受体高度可调的光吸收特性和电子能级有利于实现高的开路电压和更充分的太阳光谱吸收. 因此有利于高效率叠层电池的制备^[19-21]. 然而, 到目前为止, 仍然只有少量的文献报道非富勒烯叠层电池. 2016年, 李昌治和陈红征合作以P3HT:SF(DPPB)₄作为前电池, 以

* 光电高分子专辑; 2017-10-26收稿, 2017-11-09修稿; 国家自然科学基金(基金号 51673201, 91333204, 21325419, 91633301)和中国科学院B类先导专项(项目号 XDB12030200)资助.

** 通讯联系人, E-mail: hjhzl@iccas.ac.cn

本文附有电子支持材料, 与正文一并刊载在本刊网站<http://www.gfzxb.org>

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2018.17297

PTB7-Th:IEIC作为后电池,制备了双层的非富勒烯叠层电池,获得了1.97 V的 V_{oc} ^[22]. 2017年,颜河课题组通过使用低能量损失的P3TEA:SF-PDI₂制备了双层的非富勒烯叠层电池,获得了高达2.13 V的 V_{oc} ^[23]. 但是,他们所使用的活性层材料吸收局限在800 nm范围,导致低的短路电流密度. 最近,我们课题组选用光谱互补的PBDB-T:ITCC-M和PBDTTT-E-T:IEICO分别用以制备叠层电池的前、后子电池,获得了高达13.8%的PCE^[9]. 然而,这个叠层电池中的前电池在短波长区域吸收较弱,后电池的吸收光谱也仅限制在900 nm左右,另外,其前电池有较大能量损失(0.68 eV). 因此,可以通过进一步拓宽后电池的吸收光谱,降低前电池的能量损失,实现 J_{sc} 和 V_{oc} 的最大化,将双结串联叠层电池的PCE进一步提高.

在本工作中,通过使用J52-2F^[24]取代PBDB-T^[25]制备前电池,使前电池在短波方向的吸收光谱相对蓝移了42 nm(如图1所示). 与此同时,以

IEICO-4F^[26]制备后电池,吸收光谱的半峰宽相对于IEICO^[16]红移62 nm. 前后电池的组合实现了300~1000 nm范围内更加有效的光谱利用. 与此同时,在制备的器件中,前电池和后电池的能量损失分别低至0.64和0.53 eV,促使叠层器件实现理想的开路电压. 最终,我们通过仔细的器件优化,成功地通过全溶液加工的方法在叠层电池中获得了14.9%的能量转化效率. 中国计量科学研究院(NIM)的认证结果是14.0%. 据我们所知,这也是目前有机太阳能电池领域最高的能量转化效率.

1 实验部分

1.1 主要材料

本实验中用到的J52-2F^[24]和PCP-Na^[27]分子按照文献中的的方法合成. IT-M^[28]、IEICO-4F^[26]、PTB7-Th^[29]和PFN-Br^[30]购于朔纶有机光电科技(北京)有限公司.

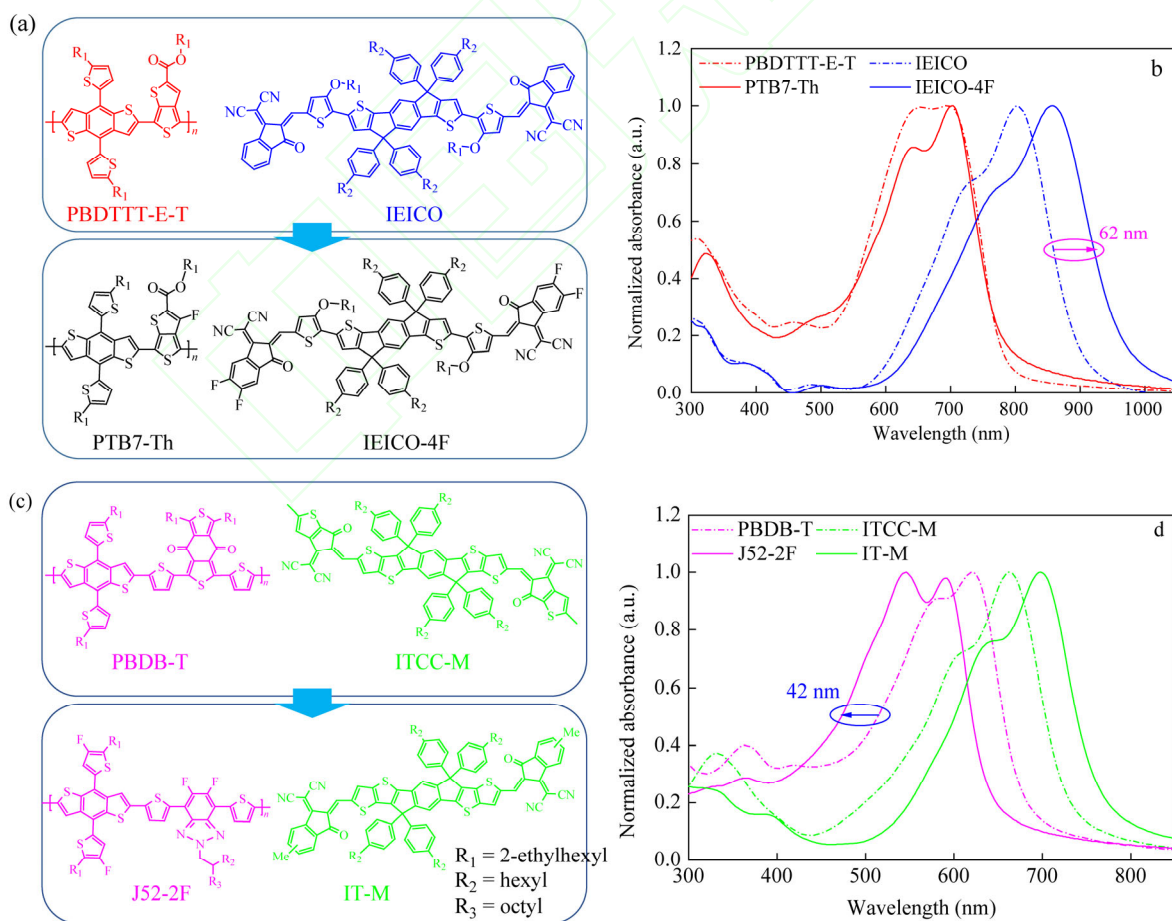


Fig. 1 (a) Molecular structures and (b) normalized absorption spectra of the photoactive materials for rear cells; (c) Molecular structures and (d) normalized absorption spectra of the photoactive materials for front cells

1.2 器件的制备

1.2.1 单节电池的制备

以J52-2F和IT-M作为活性层制备前电池. 器件结构为ITO/Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS)/J52-2F:IT-M/ZnO (5 nm)/Al. 首先, 称取J52-2F和IT-M ($W/W=1/1$), 将其以总浓度20 mg/mL溶于氯苯(CB)中, 在60 °C下搅拌备用. 将PEDOT:PSS (Clevios P VP Al. 4083)旋涂在预先经过紫外臭氧处理的ITO玻璃上, 以150 °C退火15 min. 随后, 将其移到手套箱中, 在J52-2F和IT-M的混合溶液中加入0.5%体积比的1,8-二碘辛烷. 待基底冷却到室温后, 将活性层旋涂在PEDOT:PSS上, 以100 °C退火10 min. 然后, 再将5 nm厚ZnO纳米粒子层旋涂在活性层上. 最后在高真空下蒸镀上100 nm的铝电极完成器件的制备.

以PTB7-Th和IEICO-4F作为活性层制备后电池. 器件结构为ITO/PCP-Na (5 nm)/PTB7-Th:IEICO-4F/PFN-Br (5 nm)/Al. 其器件制备方法与前电池方法类似. 不同的是溶液的配置方法. PTB7-Th和IEICO-4F的质量比是1:2, 以氯仿(CF)为溶剂, 总浓度为20 mg/mL, 所使用的添加剂为2%体积比的1-氯萘(CN).

1.2.2 叠层电池的制备

叠层器件按照先前报道的器件结构制备^[9]. 前后电池活性层的加工方法与单节电池相一致.

1.3 器件性能测试

器件的光伏特性($J-I$)曲线在100 mW/cm² AM 1.5 G的光源下测试. 所用的光源是AAA太阳模拟器. 所有器件在测试之前, 先用标准硅电池校准光源. 标准硅电池购于中国台湾光焱科技股份有限公司, 经过中国计量科学研究院(NIM)标定. 器件的外量子效率(EQE)使用光焱公司的QE-R3011太阳能电池光谱响应测量系统进行测量. 最优的器件被送到在NIM做第三方结果认证.

2 结果与讨论

2.1 前后电池活性层材料的选择

双层的叠层电池通过串联前后2个子电池制备而成. 由于前后的子电池在叠层中利用不同能量的光子, 因此非常有必要合理分配前后电池的

吸收范围, 实现光子的合理利用.

首先, 为了进一步拓宽光谱, 我们优先选择窄带隙的后电池材料. 最近, 我们课题组报道了一个1.24 eV带隙的非富勒烯受体, IEICO-4F^[26]. 如图1所示. 它的半峰宽相对于先前报道的IEICO显著红移了62 nm. 考虑到后电池和前电池应该具有互补的光谱, 我们需要使用窄带隙的给体材料制备后电池以便留出足够的光谱给前电池. 由于聚合物给体PTB7-Th不仅在600 nm以前具有弱的吸收, 而且先前的报道中已经表明它能与IEICO-4F相匹配获得优异的器件性能. 因此, 选择PTB7-Th:IEICO-4F制备后电池.

对于前电池的选择, 如果PTB7-Th:IEICO-4F的外量子效率(EQE)在长波方向能够保证70%的响应值, 那么以它制备后电池将会比PBDT-TT-E-T:IEICO在长波方向多输出2.60 mA/cm²的 J_{SC} (如图2所示). 在此前提下, 如果前电池仍然使用PBDB-T:ITCC-M体系, 那么后电池将会输出高达14.6 mA/cm²的 J_{SC} . 这样, 前后电池的电流将很难达到平衡. 也就是说, 为了形成与后电池匹配的 J_{SC} , 前电池的吸收光谱需要进一步拓宽. 因此, 我们选择吸收边在780 nm的IT-M作为电子受体取代ITCC-M, 提高前电池的吸收范围并减少后电池在短波方向的光子利用. 另外, PBDB-T吸收主要分布在514 ~ 616 nm之间, 在500 nm以前的吸收则比较弱. 为了实现蓝光区域光谱更有效的利用, 我们选用J52-2F作为给体与IT-M搭配. J52-2F的吸收半峰宽相对于PBDB-T蓝移了42 nm. 这样材料的选择将有助于前电池实现高的 J_{SC} .

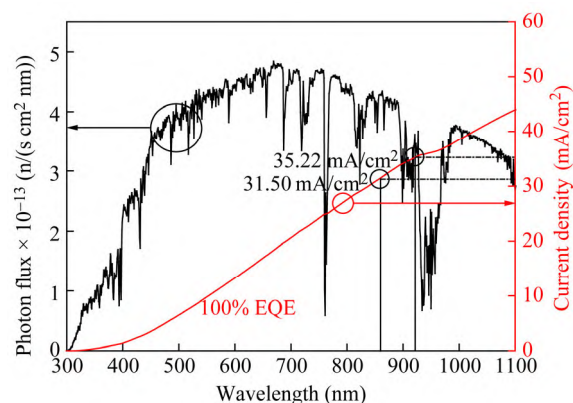


Fig. 2 Integrated current density from the AM1.5G photon flux

2.2 前电池的制备

在确定了活性层组成之后,我们以J52-2F:IT-M制备了器件并研究其性能.相应的器件结构为:ITO/PEDOT:PSS (10 nm)/J52-2F:IT-M ZnO (5 nm)/Al.对于J52-2F:IT-M的器件,我们进行了仔细的优化,实验部分给出了最优的制备过程.在这里,为了做一个清晰的对照,我们按照先前文献报道的方法制备了PBDB-T:ITCC-M的器件.为了制备叠层器件的需要,我们测试了J52-2F:IT-M的器件在不同膜厚下的器件性能.图3(a)给出了器件的 $J-V$ 曲线,相应的器件参数列于表1中.对于J52-2F:IT-M的器件,当活性层的厚度在100 nm时,器件获得了最高12.6%的PCE,相应的 V_{OC} , J_{SC} 和填充因子(FF)分别为0.952 V, 18.2 mA/cm²和0.726.相对于PBDB-T:ITCC-M的器件,尽管 V_{OC} 略微下降,但是器件的能量损失从0.69 eV降低到0.64 eV.另外,基于J52-2F:IT-M的器件 J_{SC} 相对于PBDB-T:ITCC-M显著提高了3.50 mA/cm².如图3(b)所示,在2组器件最优的外量子效率(EQE)图谱中,相对于PBDB-T:ITCC-M

的器件, J52-2F:IT-M器件的光谱响应不仅明显红移了45 nm,而且器件在整个吸收光谱内表现出更强的光电响应.特别是在400 ~ 500nm范围内,基于PBDB-T:ITCC-M的器件有一个明显的沟壑.但是,基于J52-2F:IT-M的器件,在这个区间内呈现出一个峰值(EQE达82%).这主要是因为J52-2F的吸收光谱的半峰宽相对于PBDB-T发生了蓝移,在这个区间具有更强的吸收.通过EQE获得的积分电流密度为18.0 mA/cm²,这与 $J-V$ 测试的结果相一致,证明了 $J-V$ 测试电流的可靠性.此外,相对于PBDB-T:ITCC-M的器件, J52-2F:IT-M器件的填充因子也从0.652提高到了0.726.这些结果证明J52-2F:IT-M器件是一个制备叠层电池前电池的理想选项.

2.3 后电池的制备

对于PTB7-Th:IEICO-4F的后电池,其吸收光谱接近1000 nm,并且在长波方向的EQE响应达到了70%以上,能量损失也保持在0.52 eV^[26].显然,这是一个用于制备高效率后电池的理想选项.然而,在先前的工作中,由于器件加工采用高沸

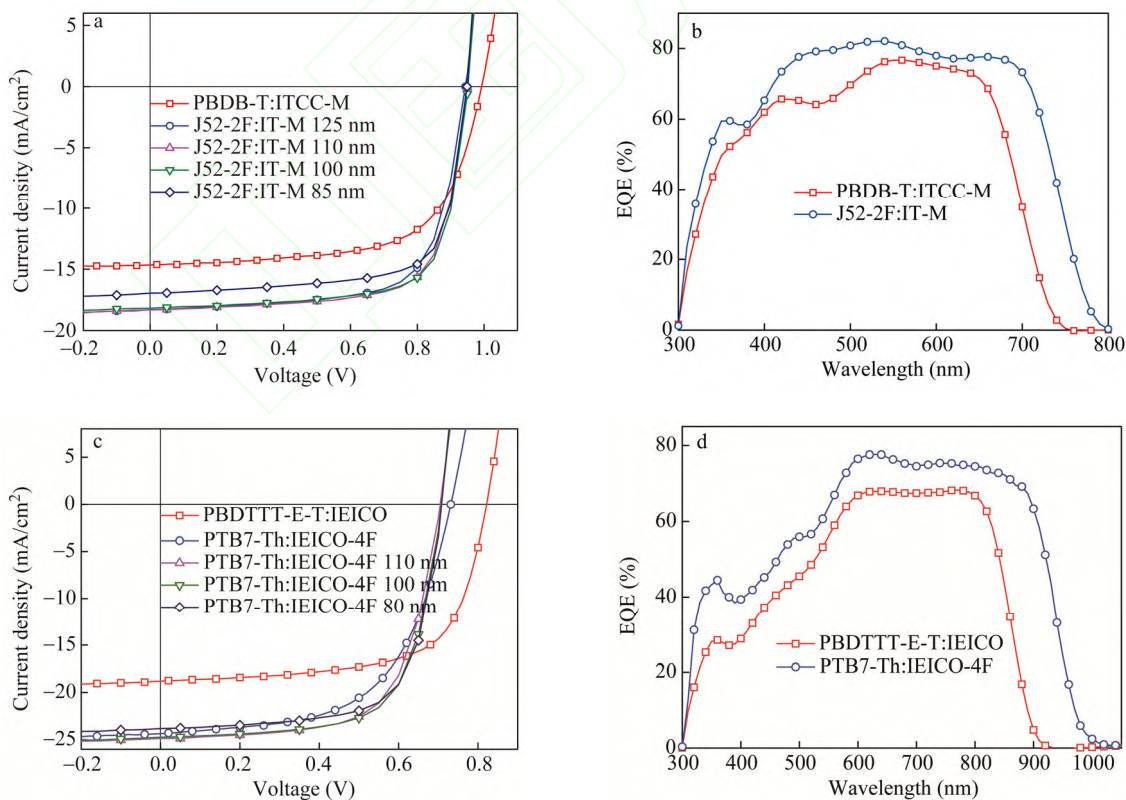


Fig. 3 (a) $J-V$ curves and (b) EQE spectra of PBDB-T:ITCC-M and J52-2F:IT-M OSCs; (c) $J-V$ curves and (d) EQE spectra of PBDTTT-E-T:IEICO and PTB7-Th:IEICO-4F OSCs

点的氯苯作为溶剂, 其挥发过程较长, 在器件制备中容易导致对前电池的侵蚀. 为了解决该问题, 我们需要基于一个低沸点溶剂重新优化 PTB7-Th:IEICO-4F 电池的器件制备过程.

氯仿是一个常用的且具有良好溶解能力的低沸点溶剂. 在此, 我们将其作为氯苯的替换溶剂用于器件制备. 经过仔细的优化我们发现当 D/A 比为 1:2, 在氯仿溶液中加入 2% 体积比的 CN 时, 器件呈现最优的性能. 详细的器件制备过程见实验部分. 图 3c 给出了 $J-V$ 曲线, 表 1 列出了详细的器件参数. 基于 PTB7-Th:IEICO-4F 的器件在 100 nm 时获得最高的 11.9% 的 PCE, 0.708 V 的 V_{oc} , 24.7 mA/cm² 的 J_{sc} 和 0.679 的 FF. 相较于先前报道的结果, 填充因子有了显著的提升. 为了做一个清晰的对比, 我们也制备了 PBDTTT-E-T:IEICO 的器件. 相对于 PBDTTT-E-T:IEICO 的器件, 基于 PTB7-Th:IEICO-4F 的器件性能显著提高, 这主要得益于电流从 18.9 mA/cm² 显著地提高到 24.7 mA/cm². 这将有利于叠层获得高的短路电流.

两组器件的最优的外量子效率如图 3(d) 所示. 在图中, 我们可以看到, PTB7-Th:IEICO-4F 器件的 EQE 响应范围在 300 ~ 1000 nm 之间, 而 PBDTTT-E-T:IEICO 的器件局限在 920 nm 以内. 同时, 在整个响应范围内, PTB7-Th:IEICO-4F 器件的 EQE 值均高于 PBDTTT-E-T:IEICO 的器件, 这也促使积分电流密度从 18.4 mA/cm² 提高到了 24.0 mA/cm². 此外, 值得注意的是, PTB7-Th:IEICO-4F 的器件在短波长方向呈现相对低的 EQE 响应, 而在长波方向方向的 EQE 响应值则均

在 70% 以上. 对于制备叠层器件来说, 这是一个极其理想的情况.

2.4 叠层电池的制备

为了获得高性能的叠层电池, 我们使用了先前报道的一个比较成功的器件结构: ITO/PEDOT:PSS/J52-2F:IT-M/ZnO/PCP-Na/PTB7-Th:IEICO-4F/PFN-Br (5 nm)/Al (如图 4(a) 所示). 对应材料的能级如图 4(b) 所示. 因为 2 个活性层的厚度对于平衡子电池的短路电流密度极其关键, 我们在这个叠层器件中重点优化了前、后子电池的活性层厚度. 表 2 列出了不同厚度下的器件参数. 从表 2 中, 可以看到叠层电池的 V_{oc} 保持在 1.65 V 左右, 基本等于前、后子电池的开路电压之和, 这就说明连接层能够有效地连接 2 个子电池, 保证前后电池形成良好的接触. 得益于前、后子电池的效率对膜厚的低敏感性, 在调节前、后子电池厚度的过程中, 叠层器件的填充因子基本保持在 0.675 左右. 随着膜厚的调控, 只有电流呈现明显的变化, 这就意味着前、后子电池厚度的改变主要对光吸收和电流匹配性产生影响. 当前电池的厚度为 110 nm, 后电池的厚度为 100 nm 时, 叠层器件的能量转换效率达到最高, 即 14.9%, 对应的 V_{oc} 为 1.65 V, J_{sc} 为 13.3 mA/cm², FF 为 0.680. 相对而言, 基于 PBDB-T:ITCC-M/PBDTTT-E-T:IEICO 的对照器件的 PCE 为 13.4%, 相应的 J_{sc} 仅有 11.5 mA/cm². 最优器件的 $J-V$ 曲线如图 4(c) 所示. 我们将该电池进行封装后, 在 NIM 进行了第三方认证, 获得了 14.0% 的能量转化效率, 对应的 V_{oc} 为 1.64 V, J_{sc} 为 12.9 mA/cm², FF 为 0.664, 这非常接近我们的测试结果 (见电子支持信息图 S1).

Table 1 Photovoltaic parameters of single-junction devices

| Active layer | V_{oc} (V) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | PCE ^c (%) | Thickness (nm) |
|-------------------------------|--------------|--------------------------------|-------|----------------------|----------------|
| PBDB-T:ITCC-M | 0.993 | 14.7 | 0.652 | 9.52 (9.28 ± 0.19) | 100 |
| J52-2F:IT-M | 0.944 | 18.3 | 0.697 | 12.0 (11.7 ± 0.2) | 125 |
| | 0.950 | 18.3 | 0.720 | 12.5 (12.2 ± 0.2) | 110 |
| | 0.952 | 18.2 | 0.726 | 12.6 (12.3 ± 0.2) | 100 |
| | 0.949 | 17.0 | 0.725 | 11.7 (11.3 ± 0.3) | 85 |
| PBDTTT-E-T:IEICO | 0.822 | 18.8 | 0.661 | 10.2 (9.82 ± 0.26) | 100 |
| PTB7-Th:IEICO-4F ^a | 0.731 | 24.4 | 0.585 | 10.4 (10.0 ± 0.3) | 100 |
| PTB7-Th:IEICO-4F ^b | 0.705 | 24.9 | 0.663 | 11.6 (11.3 ± 0.2) | 110 |
| | 0.708 | 24.7 | 0.679 | 11.9 (11.5 ± 0.3) | 100 |
| | 0.708 | 23.8 | 0.686 | 11.6 (11.2 ± 0.3) | 80 |

^a Chlorobenzene is used as a solvent and the device was fabricated according to reported methods; ^b Chloroform is used as a solvent; ^c The average PCE was calculated from more than 10 devices. The devices based on PBDB-T:ITCC-M and PBDTTT-E-T:IEICO were fabricated according to the optimal conditions in a previous work than 10 independent cells.

Table 2 Photovoltaic parameters of tandem devices with different thicknesses of the subcells

| Thickness (nm) | | V_{oc} (V) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | PCE ^a (%) |
|----------------|-----------|--------------|--------------------------------|-------|----------------------|
| Front cell | Rear cell | | | | |
| 130 | 120 | 1.79 | 11.5 | 0.648 | 13.4 (12.9 ± 0.3) |
| 120 | 100 | 1.64 | 12.9 | 0.675 | 14.3 (13.8 ± 0.3) |
| 110 | 100 | 1.65 | 13.3 | 0.680 | 14.9 (14.5 ± 0.2) |
| 100 | 100 | 1.65 | 12.8 | 0.674 | 14.2 (13.9 ± 0.2) |
| 110 | 110 | 1.65 | 13.2 | 0.679 | 14.8 (14.5 ± 0.2) |
| 110 | 80 | 1.65 | 12.1 | 0.677 | 13.4 (13.0 ± 0.3) |

^a The average PCE was calculated from more than 10 devices.

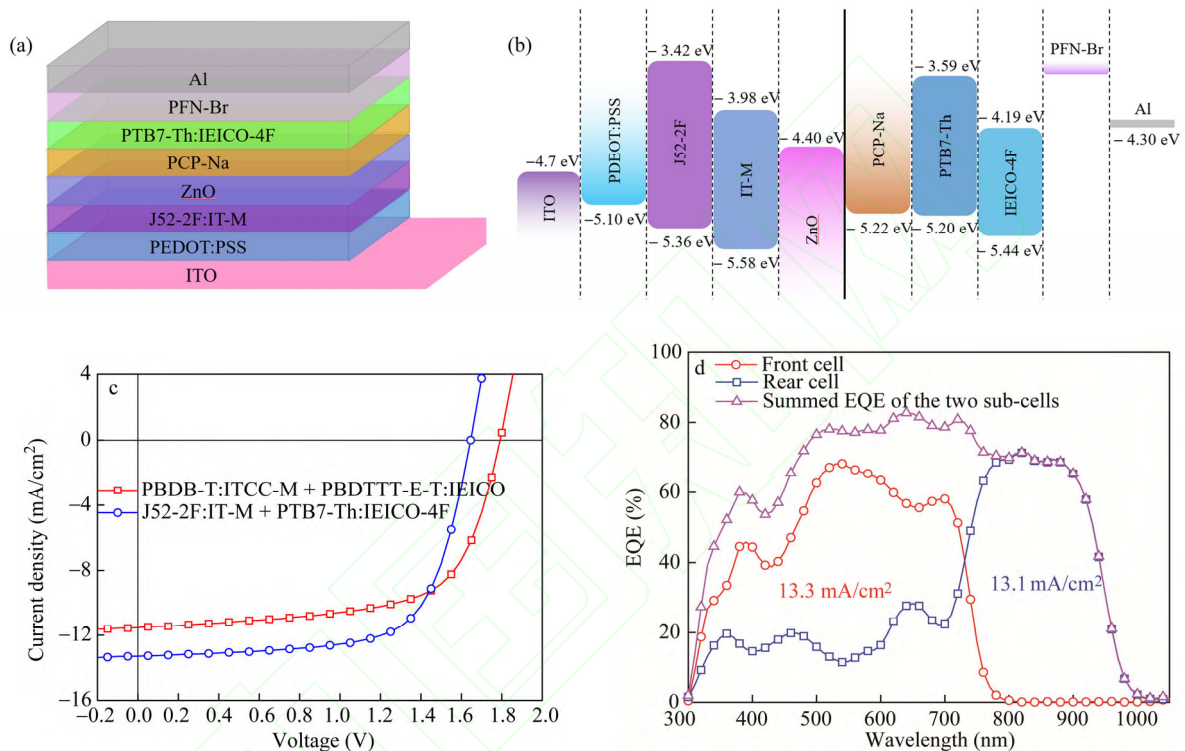


Fig. 4 (a) Device architecture of the tandem OSCs; (b) Schematic energy level diagram of each material in this tandem OSCs; (c) J - V curves of tandem OSCs; (d) EQE spectra of front and rear subcells and the summed EQE spectra of the subcells

根据我们的经验, 验证效率略低于实验室内测结果的原因主要是封装过程中强紫外光和固化胶所导致。

为了进一步解释较高的短路电流密度, 我们研究了器件的EQE. 如图4(d)所示, 前电池和后电池的EQE分别在800和550 nm偏光下测得. 前电池和后电池的积分电流密度分别为13.3和13.1 mA/cm². 这与 J - V 测试的结果非常匹配, 并且前、后子电池也形成了平衡的短路电流密度. 从图4(d)中, 我们可以看到前电池和后电池分别在300 ~ 780 nm和780 ~ 950 nm的EQE响应均达到了70%. 特别值得注意的是, 通过加和前、后子

电池的EQE, 我们可以看到在500 ~ 750 nm范围内EQE响应甚至超过了80%.

3 结论

本文报道了一个高性能的非富勒烯叠层有机太阳能电池. 在这个叠层电池中, 我们通过使用宽带隙的J52-2F:IT-M为前电池和窄带系的PTB7-Th:IEICO-4F为后电池, 实现了对300 ~ 1000 nm范围太阳光的高效利用. 在本工作中, 前、后子电池均呈现低的能量损失和高的EQE, 制备的叠层器件获得了14.9%的能量转化效率, 对应的 V_{oc} 为1.65 V, J_{sc} 为13.3 mA/cm², FF为

0.680. 据我们所知, 该结果是有机太阳能电池领域目前最高的能量转化效率. 作为展望, 我们可以看到本工作中的前子电池的能量损失依然有进一步降低的空间, 整个电池的总外量子效率也

只能达到80%, 这两点限制了本工作中电池的开路电压和短路电流. 在未来, 如果我们可以进一步优化材料设计和器件制备, 此类叠层有机太阳能电池的光伏效率仍然具有很大的提升空间.

REFERENCES

- 1 Kaltunbrunner M, White M S, Glowacki E D, Sekitani T, Someya T, Sariciftci N S, Bauer S. *Nat Commun*, 2012, 3: 770
- 2 Heeger A J. *Adv Mater*, 2014, 26: 10 – 27
- 3 Krebs F C. *Sol Energy Mat Sol C*, 2009, 93: 394 – 412
- 4 Lizin S, Van Passel S, De Schepper E, Maes W, Lutsen L, Manca J, Vanderzande D. *Energy Environ Sci*, 2013, 6: 3136
- 5 Yao Hui Feng(姚惠峰), Hou Jianhui(侯剑辉). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2016, (11): 1468 – 1481
- 6 Zhao W, Li S, Yao H, Zhang S, Zhang Y, Yang B, Hou J. *J Am Chem Soc*, 2017, 139: 7148 – 7151
- 7 Ameri T, Li N, Brabec C J. *Energy Environ Sci*, 2013, 6: 2390
- 8 Li M, Gao K, Wan X, Zhang Q, Kan B, Xia R, Liu F, Yang X, Feng H, Ni W, Wang Y, Peng J, Zhang H, Liang Z, Yip H L, Peng X, Cao Y, Chen Y. *Nat Photon*, 2016, 11: 85 – 90
- 9 Cui Y, Yao H, Gao B, Qin Y, Zhang S, Yang B, He C, Xu B, Hou J. *J Am Chem Soc*, 2017, 139: 7302 – 7309
- 10 Zheng Z, Zhang S, Zhang J, Qin Y, Li W, Yu R, Wei Z, Hou J. *Adv Mater*, 2016, 28: 5133 – 5138
- 11 Chen C C, Chang W H, Yoshimura K, Ohya K, You J, Gao J, Hong Z, Yang Y. *Adv Mater*, 2014, 26: 5670 – 5677
- 12 Gilot J, Wienk M M, Janssen R A J. *Adv Funct Mater*, 2010, 20: 3904 – 3911
- 13 Zhang K, Gao K, Xia R, Wu Z, Sun C, Cao J, Qian L, Li W, Liu S, Huang F, Peng X, Ding L, Yip H L, Cao Y. *Adv Mater*, 2016, 28: 4817 – 4823
- 14 Yusoff A R b M, Kim D, Kim H P, Shneider F K, da Silva W J, Jang J. *Energy Environ Sci*, 2015, 8: 303 – 316
- 15 Lu S, Guan X, Li X, Sha W E I, Xie F, Liu H, Wang J, Huang F, Choy W C H. *Adv Energy Mater*, 2015, 5: 1500631
- 16 Yao H, Chen Y, Qin Y, Yu R, Cui Y, Yang B, Li S, Zhang K, Hou J. *Adv Mater*, 2016, 28: 8283 – 8287
- 17 Liu J, Chen S, Qian D, Gautam B, Yang G, Zhao J, Bergqvist J, Zhang F, Ma W, Ade H, Inganäs O, Gundogdu K, Gao F, Yan H. *Nat Energy*, 2016, 1: 16089
- 18 Liang N, Meng D, Ma Z, Kan B, Meng X, Zheng Z, Jiang W, Li Y, Wan X, Hou J, Ma W, Chen Y, Wang Z. *Adv Energy Mater*, 2017, 7: 1601664
- 19 Lin Y, Wang J, Zhang Z G, Bai H, Li Y, Zhu D, Zhan X. *Adv Mater*, 2015, 27: 1170 – 1174
- 20 Yang F, Li C, Lai W, Zhang A, Huang H, Li W. *Mater Chem Front*, 2017, 1: 1389 – 1395
- 21 Zhao W, Qian D, Zhang S, Li S, Inganäs O, Gao F, Hou J. *Adv Mater*, 2016, 28: 4734 – 4739
- 22 Liu W, Li S, Huang J, Yang S, Chen J, Zuo L, Shi M, Zhan X, Li C Z, Chen H. *Adv Mater*, 2016, 28: 9729 – 9734
- 23 Chen S, Zhang G, Liu J, Yao H, Zhang J, Ma T, Li Z, Yan H. *Adv Mater*, 2017, 29: 1604231
- 24 Fan Q, Su W, Meng X, Guo X, Li G, Ma W, Zhang M, Li Y. *Solar RRL*, 2017, 1: 1700020
- 25 Qian D, Ye L, Zhang M, Liang Y, Li L, Huang Y, Guo X, Zhang S, Tan Z a, Hou J. *Macromolecules*, 2012, 45: 9611 – 9617
- 26 Yao H, Cui Y, Yu R, Gao B, Zhang H, Hou J. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56: 3045 – 3049
- 27 Cui Y, Xu B, Yang B, Yao H, Li S, Hou J. *Macromolecules*, 2016, 49: 8126 – 8133
- 28 Li S, Ye L, Zhao W, Zhang S, Mukherjee S, Ade H, Hou J. *Adv Mater*, 2016, 28: 9423 – 9429
- 29 Liao S H, Jhuo H J, Cheng Y S, Chen S A. *Adv Mater*, 2013, 25: 4766 – 4771
- 30 Huang F, Wu H B, Wang D, Yang W, Cao Y. *Chem Mater*, 2004, 16: 708 – 716

Organic Solar Cells with an Efficiency Approaching 15%

Yong Cui, Hui-feng Yao, Chen-yi Yang, Shao-qing Zhang, Jian-hui Hou*

(State Key Laboratory of Polymer Physics and Chemistry, Beijing National Laboratory for Molecular Sciences, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract In this work, we focus on the fine-tuning of absorption spectra to achieve well-matched light response and reducing the energy loss ($E_{\text{loss}} = E_{\text{g}}^{\text{opt}} - e*V_{\text{OC}}$, where $E_{\text{g}}^{\text{opt}}$ is the optical bandgap, and V_{OC} is the open circuit voltage) for the sub-cells of tandem organic solar cells (OSCs) to improve photovoltaic performance. We select PTB7-Th:IEICO-4F with a band gap of 1.24 eV as the rear cell and J52-2F:IT-M with a band gap of 1.59 eV as the front cell to fabricate the tandem OSCs. The absorption spectra of PTB7-Th:IEICO-4F is mainly located in the region of 600 – 950 nm, while that of J52-2F:IT-M is mainly located in the region of 450 – 750 nm. Their response spectra are very complementary, and both of the sub-cells show high external quantum efficiency, prompting the tandem OSCs to realize high-efficiency utilization of solar spectrum in the range of 300 – 1000 nm. In this tandem OSC, the E_{loss} in both front and rear cells are also effectively controlled to be 0.64 and 0.53 eV, respectively. In addition, an efficient interconnection layer (ICL) of ZnO/PCP-Na is used to connect the front and the rear sub-cells, which shows outstanding diode characteristics and high light transmittance in the long wavelength direction. In view of these excellent properties, the tandem solar cells manufactured in this work possess the advantages of high short-circuit current density (J_{SC}) and V_{OC} , reaching 13.3 mA/cm² and 1.65 V, respectively. The highest power conversion efficiency (PCE) of the tandem OSC reaches 14.9%. The device parameters decrease slightly after encapsulation due to the intense ultraviolet irradiation, and a certified PCE of 14.0%, with a V_{OC} of 1.64 V, a J_{SC} of 12.9 mA/cm², and a fill factor (FF) of 0.664, recorded by National Institute of Metrology (NIM), China. This result is the best obtained in the organic photovoltaic field.

Keywords Organic solar cells, Polymer solar cells, Non-fullerene acceptor, Tandem solar cell, High performance

*Corresponding author: Jian-hui Hou, E-mail: hjhzlz@iccas.ac.cn

· 电子支持信息 ·

具有接近15%能量转换效率的有机太阳能电池*

崔勇 姚惠峰 杨晨熠 张少青 侯剑辉**

(中国科学院化学研究所 高分子物理与化学国家重点实验室 北京 100190)



Fig. S1 A certified result of the tandem OSCs in National Institute of Metrology, China.

* 光电高分子专辑; 2017-10-26 收稿, 2017-11-09 修稿; 国家自然科学基金(基金号 51673201, 91333204, 21325419, 91633301)和中国科学院 B 类先导专项(项目号 XDB12030200)资助。

** 通讯联系人, E-mail: hjhzzl@iccas.ac.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2018.17297