

前沿领域综述

有机共混结构叠层太阳电池的研究进展*

於黄忠†

(华南理工大学物理系, 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

(中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州 510640)

(2012 年 5 月 7 日收到; 2012 年 8 月 15 日收到修改稿)

有机太阳电池由于质轻、价廉、柔性, 受到人们的广泛关注. 单个有机材料只能吸收部分太阳光, 叠层结构的太阳电池将不同吸收带隙的有机材料通过中间层连接起来, 既能充分吸收太阳光, 又能提高太阳电池的开路电压或短路电流. 本文综述了近年来有机共混结构叠层太阳电池的研究进展, 介绍了各种叠层有机太阳电池的结构、原理及性能, 阐述了国内外有机叠层太阳电池研究的现状及存在问题, 为高性能有机太阳电池的研究提供有价值的参考.

关键词: 有机太阳电池, 叠层, 共混结构, 进展

PACS: 72.40.+w, 72.80.Le, 73.50.Pz, 73.61.Wp

DOI: 10.7498/aps.62.027201

1 引言

随着全球能源需求量的日益增加, 对可再生能源的有效利用成为亟待解决的主要问题. 现在使用的传统能源石油、天然气和煤等已经不能满足人类发展的需要, 而且这些能源在开采、运输和使用过程中会严重污染环境. 因此, 发展新能源和新能源材料是我国进入 21 世纪必须解决的重大课题^[1-3]. 太阳能、生物质能、核能(新型反应堆)、风能、地热、海洋能等一次能源和二次能源中的氢能被认为是新能源的代表. 其中占地球总能量 99% 以上的太阳能具有取之不尽、用之不竭、清洁无污染且价廉等特点, 逐渐成为各国科学家竞相开发和利用的新能源^[1-5].

价廉、高效、可大面积制备的太阳电池一直是人们追求的目标. 目前用作太阳电池的材料主要有元素半导体材料、无机半导体材料等. 其中无机半导体材料起步较早, 研究得比较充分, 在产业化方面已经取得了很大进展. 但无机半导体材料的加工工艺复杂、材料要求苛刻且不易进行大面积柔性加工, 因此成本较高. 从 20 世纪 70 年代起人们

就开始探索将一些有机共轭化合物应用到太阳电池中. 有机太阳电池材料的特点在于有机化合物的种类繁多, 分子的化学结构容易修饰, 化合物的制备、提纯和生产工艺简单^[1,3,6-8]. 有机太阳电池采用真空沉积、溶液旋涂甚至喷墨打印技术来制备, 在塑料衬底上制备柔性太阳电池, 因此成本低廉且易于大规模推广^[9-11].

2 共混结构叠层太阳电池的原理

有机太阳电池结构经历了单层、双层、共混结构的变化, 每次器件结构的改变, 都能使器件能量转换效率大幅度提高. 1995 年 Yu 等^[12] 将给体材料(donor, D)聚合物与受体材料(acceptor, A)富勒烯共混制成了共混结构的本体异质结(bulk heterojunction, BHJ)聚合物太阳电池. 与单层、双层聚合物太阳电池相比, 共混结构太阳电池增加了 D/A 相的界面面积, 减少了光生激子的扩散距离, 增加了光生激子的分离, D/A 的互穿网络也极大地提高了器件中电荷的传输能力, 光生载流子在到达相应的电极前被重新复合的概率大为降低. 聚合物太阳电池的能量转换效率大幅度地提高, 这使得聚

* 国家自然科学基金(批准号: 61176061)、亚热带建筑科学国家重点实验室(批准号: 2010KB20)和中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室(批准号: 0907K5)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hzhyu@scut.edu.cn

合物太阳能电池引起了人们的高度重视.

近十几年来, 共混结构的有机聚合物太阳能电池得到了快速的发展. 2005 年美国洛杉矶加州大学华裔教授 Yang 等^[13], 2000 年诺贝尔化学奖得主美国的 Heeger 教授等^[14] 基于聚噻吩 (P3HT) 与 C₆₀ 的衍生物 (PCBM) 为原材料共混结构的聚合物太阳能电池, 通过延长活性层膜的干燥时间及热处理方法, 提高了 P3HT 的有序性, 从而提高其迁移率, 器件的能量转换效率都达 5%. 近两年来, 世界各知名研究小组加大了新材料的研究, 聚合物新材料不断的出现, 共混结构聚合物太阳能电池的能量转换效率不断地创出新高, 其能量转换效率已达 7% 以上^[7,15-25]. 国内各知名高校及研究所也开展了共混结构太阳能电池的研究, 并取得了可喜的成绩^[7,24,25-33]. 其中中科院化学研究所与华南理工大学研究团队都通过合成出新的给体材料或受体材料, 将共混结构太阳能电池能量转换效率提高到一定的水平^[7,11,16-18,24,26], 其中华南理工大学研究团队做出单个有机聚合物太阳能电池能量转换效率达 9.23%^[11].

但与无机半导体太阳能电池相比, 与可能转化应用的要求相比, 有机太阳能电池能量转换效率还比较低, 进一步提高能量转换效率是当前聚合物太阳能电池研究的重点. 目前聚合物太阳能电池存在的主要问题包括: 1) 聚合物材料吸收光谱与太阳光谱不匹配, 这使得太阳光利用率低, 器件的短路电流不

高. 2) 聚合物材料中电荷载流子迁移率低 (一般为 $10^{-5} \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$), 使得聚合物太阳能电池中电荷传输效率低, 光生电荷复合较大^[34]. 太阳光波长范围一般在 350—1500 nm 之间, 在 700 nm 处能量最强. 为了有效地俘获太阳能, 聚合物能隙应该在 1.8 eV 以下, 同时活性层的厚度尽可能地增加, 以便吸收更多的太阳光, 但有机材料中电荷载流子迁移率不高, 限制了活性层的厚度, 过大的活性层的厚度会增加器件中电荷的复合, 从而严重地降低器件的填充因子.

太阳光光谱可以被分成连续的若干部分, 用能带宽度与这些太阳光光谱有最好匹配的材料做成电池, 并按禁带宽度从大到小的顺序从外向里叠加起来, 让波长较短的光被最外边的宽带隙材料电池吸收, 波长较长的光能够透射, 并让较窄禁带宽度材料电池利用, 这就有可能最大限度地光能变成电能, 这样结构的电池就是叠层太阳能电池^[35], 图 1 为叠层串联太阳能电池的图形及能级图.

器件结构的改变是提高其性能的一个重要方面, 叠层结构太阳能电池的制备能较好地克服以上的不足. 利用中间连接层可将不同吸收波段的聚合物叠加串联 (或并联) 起来, 既能够增加太阳光的吸收, 又能够提高太阳能电池的开路电压 (或短路电流), 器件的性能也会相应大幅度地增加. 叠层结构的太阳能电池在无机太阳能电池及染料敏化太阳能电池已被人们高度重视并加以研究^[36,37], 叠层结构可以有效地提高太阳能电池的能量转换效率.

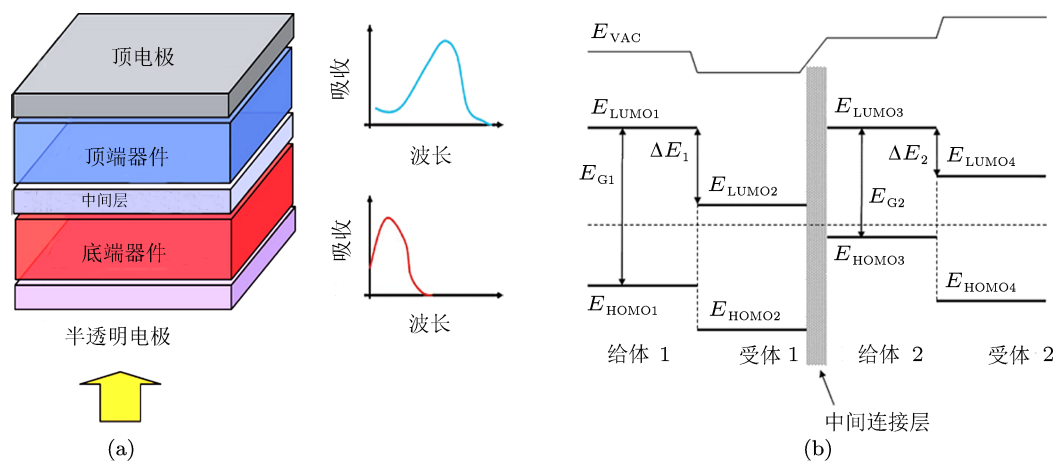


图 1 叠层串联结构太阳能电池结构 (a)^[38] 及能级图 (b)^[39]

3 国内、外研究现状及发展动态

1990 年 Hiramoto 首先报道了有机叠层太阳能电池, 器件由底、顶两个子太阳能电池叠加而成, 中间由 2 nm 的金 (Au) 作为中间连接层^[40]. 底、顶部子

电池都由相同的材料 H2-phthalocyanine(H₂Pc) 和 perylene tetracarboxylic(Me-PTC) 组成, 其器件结构为 ITO/ Me-PTC/H₂Pc/Au/ Me-PTC/H₂Pc/Au. 实验发现电池连接体 Au 能有效地复合底层电池的电子和顶层电池的空穴, 串联后的有机太阳能电池的开

路电压比单个太阳电池的开路电压增加了一倍为 0.78 V.

由于共混结构能增加太阳电池中光生激子的分离及传输, 共混体系的叠层太阳电池也得到了人们的广泛关注. 2004 年 Forrest 以 CuPc: C₆₀ 的共混体系为底、顶子电池材料, 以银 (Ag) 作为中间连接层制成共混体系叠层太阳电池^[41]. 为了提高电荷在太阳电池中的传输, 在各子电池中增添了空穴传输材料 CuPc 和电子传输材料 PTCBI, C₆₀. 顶部子电池增加了电荷的阻挡层 BCP, 从而阻挡顶电池中空穴到达阴极. 通过调节各层的厚度, 得出最佳太阳电池能量转换效率 5.7%(AM1.5 100 MW/cm² 的光照下).

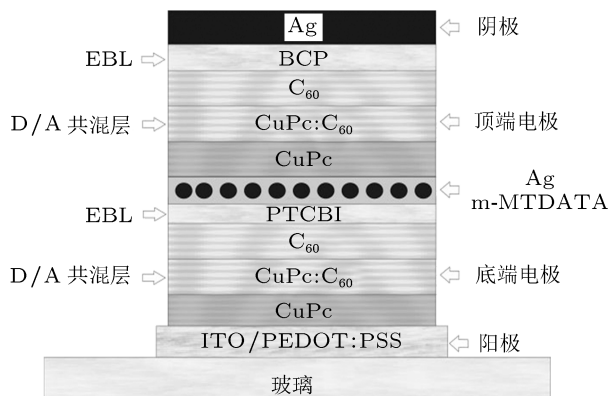


图2 共混结构叠层太阳电池^[37]

图3为三个单个太阳电池串联而成的叠层太阳电池^[42], 共混体系以 P3HT: PCBM 为活性层材料, 中间连接层为 Al/MoO₃, 器件结构为 ITO/PEDOT/P3HT: PCBM/Al/MoO₃/P3HT: PCBM/Al/MoO₃/P3HT: PCBM/Al. 实验结果表明叠层结构太阳电池的开路电压为 1.73 V, 基本为三个单个太阳电池开路电压之和, 在 AM1.5 100 MW/cm² 的光照下, 器件的能量转换效率为 2.03%. 这些结果说明了中间连接层 Al/MoO₃ 能有效地连接各个子电池, 但串联叠层结构太阳电池的能量转换效率没有明显提高, 甚至不如其中单个太阳电池的能量转换效率 2.64%. 这是因为串联太阳电池虽然可以提高器件的开路电压, 但整个器件的短路电流只能是由其中短路电流较小的子电池决定. 图3中叠层结构太阳电池中的三个子电池是同种材料 P3HT: PCBM 做成, 最顶端的子电池由于获得的太阳光最少, 其短路电流下降, 导致整个叠层太阳电池的短路电流下降. 叠层太阳

电池在填充因子没有提高的前提下, 整体太阳电池的能量转换效率反而下降. 这些因素说明叠层串联太阳能中各子电池的短路电流的匹配相当重要.

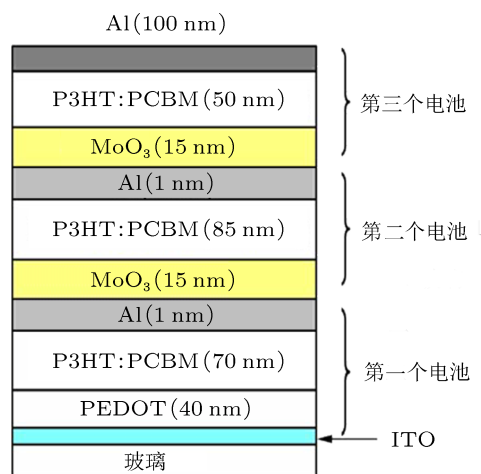


图3 三个共混结构叠加成的太阳电池^[42]

2009 年, 美国加州大学洛杉矶分校 Yang 课题组的 Sista 利用 Al/TiO₂/PEDOT: PSS 为中间连接层, 制备出结构为 ITO/PEDOT: PSS/P3HT: PCBM/Al/TiO₂/PEDOT: PSS/PSBTBT: PCBM/TiO₂: Cs/Al 的串联结构太阳电池^[43], 其性能为 $J_{sc} = 7.44 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $V_{oc} = 1.25 \text{ V}$, $FF = 0.63$, $\eta = 5.84\%$. 这种叠层太阳电池中的中间连接层及阴极都是以 TiO₂ 作为电子传输层, 实验发现测量时如果以滤光片挡住紫外线时, 测出的光导 I - V 曲线具有“S”形, 严重地影响了器件的性能, 光导曲线中“S”形在有机或无机硅太阳电池中都有过报道^[44-46], 产生这种现象的原因有多种, 例如器件制备过程中的工艺、电池中的电荷传输、器件中出现反型的 pn 结等, 其中各层接触的界面影响了太阳电池中电荷的传输是其产生的主要原因. 在叠层结构的太阳电池中如何优化器件的结构, 使得叠层太阳电池中的电荷能有效地传输是叠层太阳电池中重要的研究课题.

叠层太阳电池分串联连接和并联连接两种方式, 串联连接是将底部子电池阴极通过中间连接层与顶部子电池的阳极相连. 并联连接是将底部子电池阴极 (阳极) 通过中间连接层与顶部子电池阴极 (阳极) 相连. 串联连接可以增大太阳电池的开路电压, 并联连接可以增加短路电流. 2010 年, 美国加州大学洛杉矶分校杨阳课题组的

Sista 等制成了具有 3 个终端的叠层并联结构太阳电池^[47], 图 5 是共阴极并联结构的太阳电池, 其器件结构为 ITO/PEDOT: PSS/P3HT: PCBM/TiO₂: Cs/Al/Au/TiO₂: Cs/PSBTBT: PCBM/V₂O₅/Al. 器件的性能为 $J_{sc} = 15.1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $V_{oc} = 0.6 \text{ V}$, $FF = 0.525$, $\eta = 4.8\%$. 作者还制备出了共阳极的并联结构叠层太阳电池, 结构为 ITO/TiO₂: Cs/P3HT: PCBM/PEDOT: PSS/Au/V₂O₅/PSBTBT: PCBM/Ca/Al, 电池性能为 $J_{sc} = 7.69 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $V_{oc} = 0.5 \text{ V}$, $FF = 0.52$, $\eta = 2.0\%$. 光学空间层能改变太阳电池中光波在各层中的分布, 在单器件中通过在活性层与阴极加入适当厚度的光学空间层可以调节活性层对入射光的吸收, 从而改

变太阳电池的性能. 2007 年荷兰 Blom 小组的 Hadipour 在叠层太阳电池中引入光学空间层 (PTrFE)^[48], 其器件结构为 ITO/PEDOT/P3HT: PCBM/Sm/Au/PTrFE/Au/PEDOT/PT-BEH: PCBM/LiF/Al(见图 6). 光学空间层 (PTrFE) 位于两子池中间, 其两端是中间连接层金 (Au), 透过底电池中的光与被顶电池反射回来的光在光学空间层内相互干涉, 改变光学空间层的厚度可以改变入射至顶电池的光强及波长, 从而提高顶部子电池的吸收光. 图 6(b) 为不同厚度的光学空间层, 底部子电池透射出的光谱, 这样可以根据顶部子电池的吸收光来调节光学空间层的厚度.

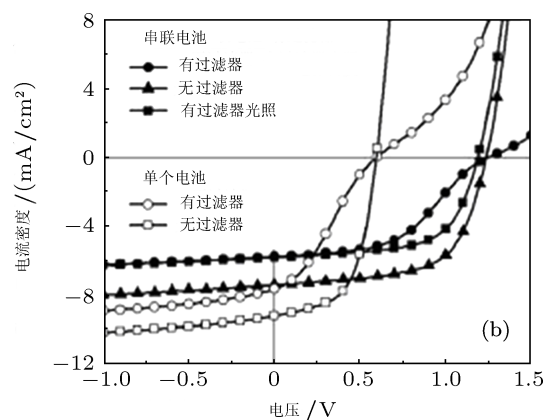
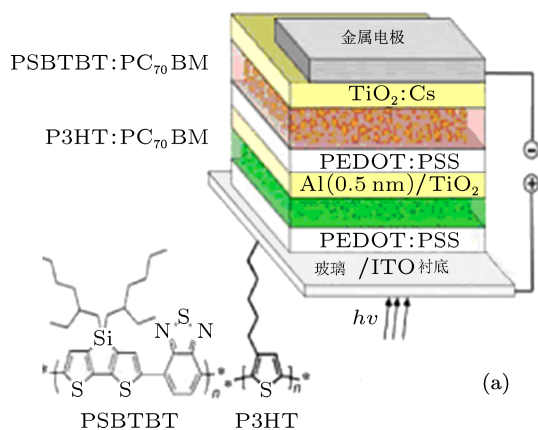


图 4 Yang 课题组制备的以 Al/TiO₂/PEDOT: PSS 为中间层的叠层太阳电池 (a) 及 $I-V$ 光导曲线 (b)^[43]

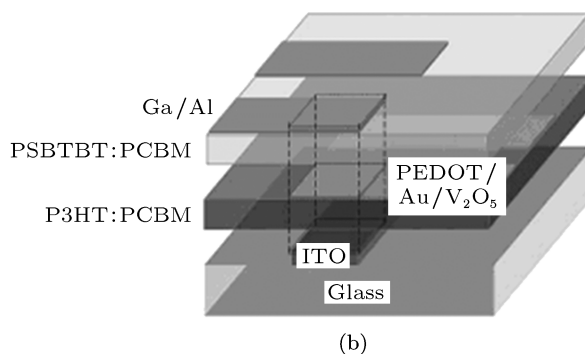
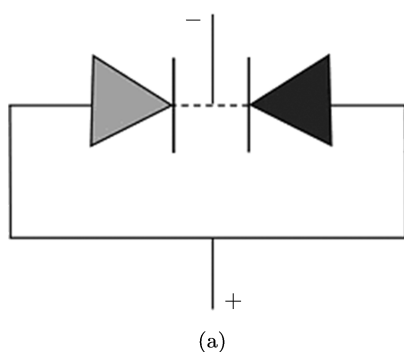


图 5 共阴极终端的叠层太阳电池原理图 (a) 及结构图 (b)^[47]

2007 年 Heeger 等^[9,49] 以 TiO_x 为连接体将共混结构的 P3HT: PC₇₀BM 体系与 PCPDTBT: PCBM 串联起来制成太阳电池, 其能量转换效率达 6.5%, 是当时有机太阳电池最高的能量转换效率. 2011

年 Yang 教授和中科院化学所李永舫教授合作, 利用 TiO₂/m-PEDOT 为中间连接层, 制备出性能较高的叠层太阳电池, 其能量转换效率为 7% 以上^[50]. 太阳电池结构为 ITO (150 nm)/PEDOT 4083

(40 nm)/P3HT: IC₆₀BA (150 nm)/TiO₂ (20 nm)/m-PEDOT (90nm)/PSBTBT: PC₇₀BM (100 nm)/Ca (20 nm)/Al (100 nm). 作者将聚苯乙烯磺酸钠掺入至聚(3, 4-亚乙二氧基噻吩)-聚(苯乙烯磺酸)(PEDOT: PSS) 中, 使其变成被修饰的聚(3, 4-亚乙二氧基噻吩)-聚(苯乙烯磺酸)(m-PEDOT), m-PEDOT 甩膜成为叠层太阳电池的中间连接层, 这种中间连接层可以克服以往的中间连接层的不足. 以往中间连接层金属氧化物或 PEDOT: PSS 等由于致密性不好、耐有机溶剂性不强, 在中间连接层上再做顶电池时, 顶电池的溶剂影响底电池的性能. 而 m-PEDOT 由于加入了聚苯乙烯磺酸钠, 其所成膜的导电性能、透光性能及抗有机溶剂性能都有所提高, 这样能做出高质量的叠层太阳电池, 器件的能量转换效率提高至 7% 以上.

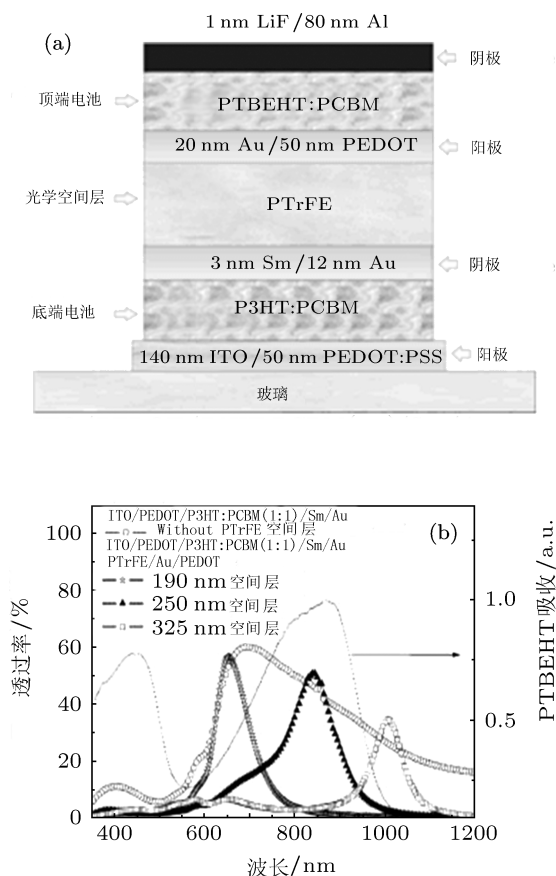


图 6 带光学空间层的叠层太阳电池 (a) 及不同厚度的光学空间层时底部子电池的透射光谱 (b)^[48]

为了能够很好地收集电子, 太阳电池的阴极一般都是采用低功函数的金属. 低功函数的金属较为活泼, 正常结构的太阳电池中的低功函数的金属与空气接触, 易与空气中的氧、水反应, 从而使器件容易老化. 但倒置结构太阳电池中,

将收集电子的活泼金属阴极与电池的锡锡氧化物 (ITO) 相连, 并放在电池的底部. 将收集空穴的不活泼的金属阳极与空气接触, 作为阳极的不活泼金属不易与空气的氧、水分反应, 从而提高太阳电池的寿命. 2011 年华裔 Yang 教授制备出倒置结构的叠层太阳电池^[51], 其器件结构为 ITO/ZnO/P3HT: PCBM//MoO₃/Al/ZnO/PSBTBT: PCBM//MoO₃/Al, ITO/ZnO 收集电子为阴极, MoO₃/Al 收集空穴为器件的阳极, 这种结构的太阳电池能极大地提高器件的寿命 (见图 8). 作者还研究了不同中间连接层对太阳器件的影响, 实验发现 MoO₃/Al/ZnO 具有较好的收集顶层电池的电子与底层电池的空穴的功能. 在叠层结构的太阳电池中中间连接层具有至关重要的作用, 中间连接层既要能透过底层太阳光, 又要复合底、顶层的电子与空穴, 同时还要保护底电池. 2010 年新加坡学者 Sun 做出了倒置结构的叠层太阳电池^[52], 比较了不同的连接层 MoO₃/Ca, MoO₃/Al/Ca, MoO₃/Ag/Ca 及 MoO₃/Ag/Al/Ca 对太阳电池性能的影响. 实验表明 MoO₃/Ag/Al/Ca 具有较好的中间连接层的作用.

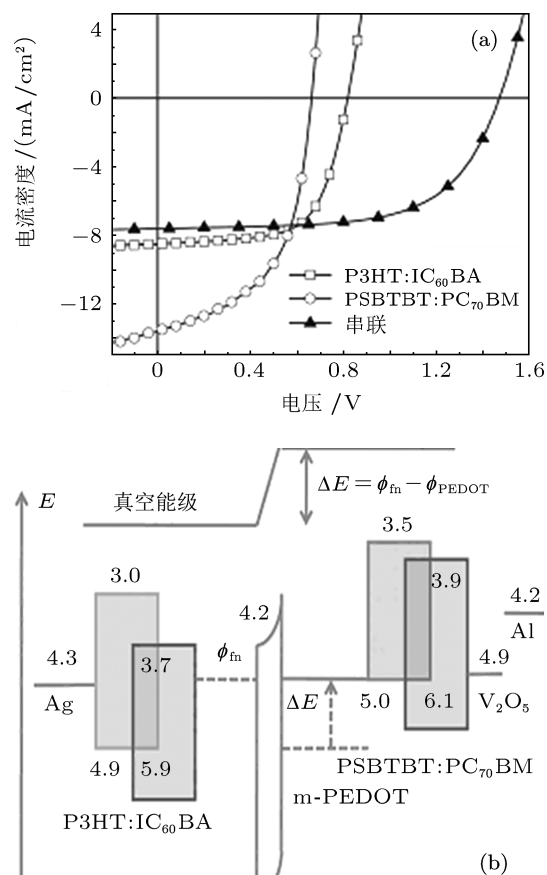
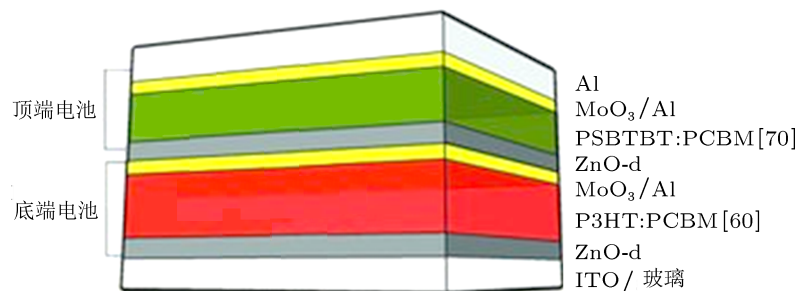
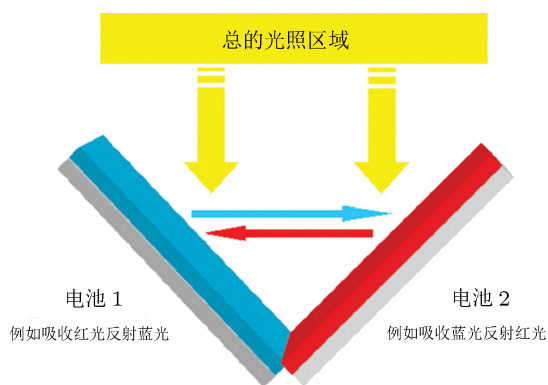


图 7 叠层电池 I-V 曲线 (a) 及能级图 (b)^[50]

图8 倒置型叠层太阳电池^[51]图9 “V”字形叠层太阳电池结构^[53]

2007年 Tvingstedt 做出图9所示V字形的叠层太阳电池^[53]。作者把吸收光互补的太阳电池材料在“V”字形斜面上做出两个子电池。当光照到电池表面时,没有被吸收的光被反射到另一子电池的表面上,被另一子电池所吸收。这样的“V”字形叠层太阳电池没有中间连接层,既充分利用了太阳光,又能克服其他叠层太阳电池中中间连接层的制备所带来的一系列问题。

叠层结构的太阳电池是将具有不同吸收太阳光的单个聚合物太阳电池连接起来的器件。不同吸收光的聚合物材料的选择至关重要,目前,新合成出的性能优越的聚合物材料大都是能隙在1.6 eV以上的材料,而性能优越的低能隙聚合物材料较少。Yang教授合成出性能良好的能隙为1.44 eV,性能优越聚合物材料(PBDTT-DPP),用其材料做出的单个太阳电池的能量转换效率达6%。将其制成叠层太阳电池时,叠层太阳电池的能量转换效率达8.62%,是目前聚合物叠层太阳电池性能最好之一^[54]。

由于叠层太阳电池能够有效地扩大太阳光的吸收范围。近几年来,世界理论科学家也加大了对

叠层太阳电池理论方面的研究。荷兰 Groningen 大学的 Blom 教授^[55-57],英国帝国大学 Brabec 教授等^[58,59]领导的研究小组都先后从理论方面对叠层结构太阳电池进行了研究。叠层太阳电池中各子电池的光、电匹配至关重要,可采用的方法有几种,子电池材料的选择、各层的厚度及中间层的选择等,选择适当的这些因素,使得太阳光能最大限度地分布在顶、底子电池中。叠层串联太阳电池开路电压应是各子电池的开路电压总和,但子电池中各短路电流要相互匹配,才能达到最佳性能。叠层并联太阳电池短路电流为各子电池的短路电流总和,但各子电池开路电压也要相互匹配。美国学者 Namkoong 以 $\text{TiO}_x/\text{PEDOT:PSS}$ 为中间连接层,以 PCPDTBT:PCBM 共混体系为底电池, P3HT:PCBM 共混体系为顶电池^[60,61]。通过模拟计算改变顶电池的厚度来调节光、电平衡,模拟得出这种结构的叠层太阳电池能量转换效率可达9%(见图10),而实验这种结构的太阳电池能量转换效率仅为6.5%。Brabec等通过计算认为,如果利用优化的底、顶部电池材料,叠层结构太阳电池的光电转换效率可以达到15%^[57](见图11)。

Blom 教授通过理论模拟研究发现,如果两个子电池开路电压有较大不同,叠层串联连接是较好的方式^[55]。如果两个子电池短路电流有较大差异,叠层并联连接可以增大其性能。在串联连接的叠层电池中各子电池的填充因子对其电池的影响很大。

近十几年来,国内中科院化学研究所^[16]、中科院长春应化所^[62-64]、北方交通大学^[65]、吉林大学、浙江大学、华南理工大学等单位也加大了对聚合物叠层结构太阳电池的研究。中科院化学研究所李永舫教授做出了目前能量转换效率较高为7%的叠层太阳电池,中科院长春应化所谢志元教授克服了叠层太阳电池制备工艺上的困难,做出了性

能较好的有机叠层串联与并联的叠层太阳电池.

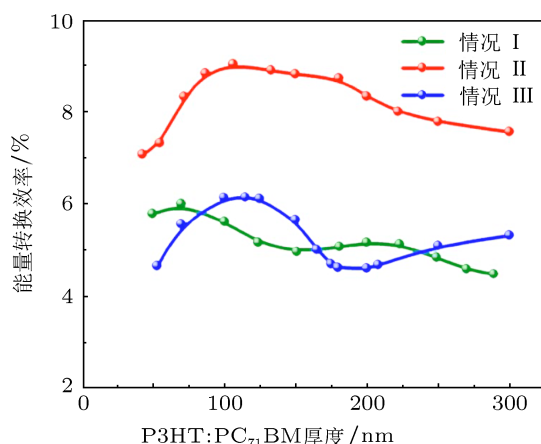


图 10 改变顶电池的厚度对叠层太阳电池性能的变化 [60]

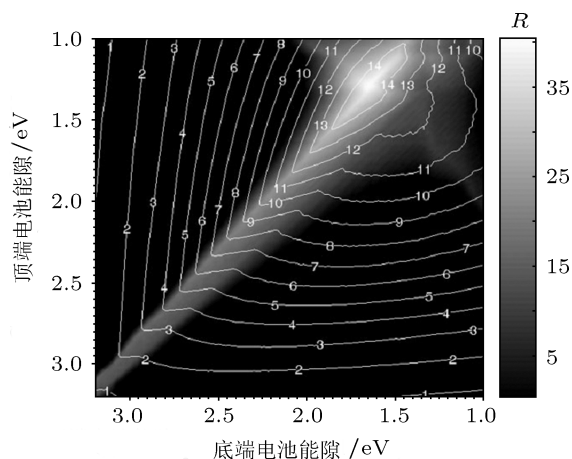


图 11 叠层太阳电池能量转换效率的展望 [57]

4 有机叠层太阳电池存在的问题及发展方向

虽然国内、外对聚合物叠层结构太阳电池的

研究有一定的进展,器件的性能及制备的工艺获得了一定的提高,但离 Brabec 教授预测的叠层太阳电池的能量转换效率应为 15%相比,目前有机叠层太阳电池很多研究工作还是有待于提高.

目前,聚合物叠层结构太阳电池面临的主要问题: 1) 底、顶部电池的匹配问题. 各子电池之间的匹配包括光学和电学的匹配. 光学匹配要求底、顶部子电池能够尽可能地吸收大范围的太阳光谱,特别是让占太阳光 42% 的红外光谱能够更好地被利用. 电学匹配要求是底、顶子电池的电子与空穴能够很好地在中间层复合,如果电子与空穴不能有效地复合,就会在器件中产生空间电荷积累,严重地影响器件中电荷的传输,降低器件的性能. 只有相匹配的电池相连接,才能获得性能较高的叠层结构太阳电池. 2) 叠层结构太阳电池中底、顶部子电池中间连接层的选择. 在串联叠层结构太阳电池内的中间连接层既能保护底部子电池单元,又是底部子电池中电子与顶部子电池中的空穴复合的部位. 如何选定适当的中间连接层有效地复合到达的电子与空穴,是提高叠层结构太阳电池性能的关键,目前,关于叠层太阳电池中的中间层的物理机理不甚了解 [66]. 而中间层的选择及制备是高性能叠层太阳电池的关键. 3) 叠层结构有机太阳电池的制备对工艺提出较高的要求. 叠层太阳电池由于层数较多,无论是采用蒸镀还是甩膜的方式成膜,上下层膜的影响是不可避免,如何减少上下膜的影响对我们的制备工艺提出了更高的要求. 用能级的观点合理解释层膜与层膜之间的接触界面问题,理解相互接触的不同材料之间界面的变化,对于叠层太阳电池的设计具有一定的意义.

有机叠层太阳电池能有效地提高器件的能量转换效率,随着研究的不断深入及关键问题的突破,相信叠层结构太阳电池能使得有机聚合物太阳电池产业化.

- [1] Chen Z W, Cao Y 2009 *Acc. Chem. Res.* **42** 1709
- [2] Gratzel M 2009 *Acc. Chem. Res.* **42** 1788
- [3] Yang Y, Wudl F 2009 *Adv. Mater.* **21** 1401
- [4] Li Y F 2012 *Acc. Chem. Res.* **45** 723
- [5] Yu H Z, Peng J B 2007 *Prog. in Chem.* **19** 1689 (in Chinese) [於黄忠, 彭俊彪 2007 化学进展 **19** 1689]
- [6] Meng L Y, Shang Y, Li Q k, Li Y F, Zhan X W, Shuai Z G, Kimber R G E, Walker A B 2010 *J. Phys. Chem. B* **114** 36
- [7] Cheng Y J, Hsieh C H, He Y, Hsu C S, Li Y F 2010 *J. Am. Chem. Soc.* **132** 17381
- [8] Heeger A 2010 *J. Chem. Soc. Rev.* **39** 2354
- [9] Sai Z G, Cao Y 2010 *Semiconducting and Metallic Polymers* (Beijing: Science Publishing House) p231 (in Chinese) [帅志刚, 曹镛 2010 半导体与金属性聚合物 (北京: 科学出版社) 第 231 页]
- [10] Yu H Z, Peng J B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3143
- [11] He Z C, Zhong C M, Su S J, Xu M, Wu H B, Cao Y 2012 *Nat. Photonics* **6** 591
- [12] Yu G, Gao J, Hummelen C, Wudl F, Heeger A J 1995 *Science* **270** 1789
- [13] Li G, Shrotriya V, Huang J S, Yao Y, Moriarty T, Emery K, Yang Y 2005 *Nat. Mater.* **4** 864

- [14] Ma W L, Yang C Y, Gong X, Lee K, Heeger A J 2005 *Adv. Funct. Mater.* **15** 1617
- [15] Huo L J, Zhang S Q, Guo X, Xu F, Li Y F, Hou J H 2011 *Angew. Chem. Int. Ed.* **50** 9697
- [16] Yang J, Zhu R, Hong Z R, He Y J, Kumar A, Li Y F, Yang Y 2011 *Adv. Mater.* **23** 3465
- [17] Tan Z A, Zhang W Q, Zhang Z G, Qian D P, Huang Y, Hou J H, Li Y F 2012 *Adv. Mater.* **24** 1476
- [18] Li X H, Choy W C H, Huo L J, Xie F X, Sha W, Ding B F, Guo X, Li Y F, Hou J H, You J B, Yang Y 2012 *Adv. Mater.* **24** 3046
- [19] Szarko J M, Guo J C, Liang Y Y, Lee B, Rolczynski B S, Strzalka J, Xu T, Loser S, Marks T J, Yu L P, Chen L X 2010 *Adv. Mater.* **22** 5468
- [20] Chen H Y, Hou J H, Zhang S Q, Liang Y Y, Yang G W, Yang Y, Yu L P, Wu Y, Li G 2009 *Nat. Photonics* **3** 649
- [21] Park S H, Roy A, Beaupré S, Cho S, Coates N, Moon J S, Moses D, Leclerc M, Lee K, Heeger A J 2009 *Nat. Photonics* **3** 297
- [22] Hou J, Chen H Y, Zhang S, Li G, Yang Y 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 16144
- [23] Liang Y Y, Xu Z, Xia J B, Tsai S T, Wu Y, Li G, Ray C, Yu L P 2010 *Adv. Mater.* **22** E135
- [24] Zhao G J, He Y J, Li Y F 2010 *Adv. Mater.* **22** 4355
- [25] Wang E G, Hou L T, Wang Z Q, Hellström S, Zhang F L, Inganäs O, Andersson M R 2010 *Adv. Mater.* **22** 5240
- [26] Wang E G, Wang L, Lan L F, Luo C, Zhuang W L, Peng J B, Cao Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 033307
- [27] Dong Q F, Zhou Y H, Pei J N, Liu Z Y, Li Y W, Yao S Y, Zhang J B, Tian W J 2010 *Org. Electron* **11** 1327
- [28] Yu H Z, Peng J B 2008 *Org. Electron* **9** 1022
- [29] Li Y, Hou Y B, Wang Y, Feng Z H, Feng B, Qin L F, Teng F 2008 *Synth. Met.* **158** 190
- [30] Yu H Z 2010 *Synth. Met.* **160** 2505
- [31] Li Y F, Zou Y P 2008 *Adv. Mater.* **20** 2952
- [32] Yu H Z, Peng J B 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1411
- [33] Liu J C, Wang W L, Yu H Z, Wu Z L, Peng J B, Cao Y 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 1403
- [34] Liu Y Q 2010 *Organic Nanometer and Molecule Device* (Beijing: Science Publishing House) p135 (in Chinese) [刘云圻 2010 有机纳米与分子器件 (北京: 科学出版社) 第 135 页]
- [35] Li Y, Hu S M 2000 *Journal of Vacuum Science and technology* **20** 222 (in Chinese) [李毅, 胡盛明 2000 真空科学与技术学报 **20** 222]
- [36] Kirk A P 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94** 2442
- [37] Uzaki K, Pandey S S, Hayase S 2010 *J. Photochemistry and Photobiology A Chemistry* **216** 104
- [38] Brabec C J, Gowrisanker S, Halls J J M, Laird D, Jia S, Williams S P 2010 *Adv. Mater.* **22** 3839
- [39] Dennler G, Scharber M C, Brabec C J 2009 *Adv. Mater.* **21** 1323
- [40] Hiramoto M, Suezaki M, Yokoyama M 1990 *Chem. Lett.* **10** 327
- [41] Xue J, Uchida S, Rand B P, Forrest S R 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5757
- [42] Zhao D W, Sun X W, Jiang C Y, Kyaw A K K, Lo G Q, Kwong D L 2009 *IEEE Electron Device Letter* **30** 490
- [43] Sista S, Park M H, Hong Z, Wu Y, Hou J H, Kwan W L, Li G, Yang Y 2010 *Adv. Mater.* **22** 380
- [44] Kumar A, Sista S, Yang Y J 2009 *Appl. Phys.* **105** 094512
- [45] Glatthaar M, Riede M, Keegan N, Sylvester-Hvid K, Zimmermann B, Niggemann M, Hinsch A, Gombert A 2007 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **91** 390
- [46] Yu H Z, Wen Y X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 038401 (in Chinese) [於黄忠, 温源鑫 2011 物理学报 **60** 038401]
- [47] Sista S, Hong Z, Park M H, Xu Z, Yang Y 2010 *Adv. Mater.* **22** E77
- [48] Hadipour A, Boer B D, Blom P W M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **102** 074506
- [49] Kim J Y, Lee K, Coates N E, Moses D, Nguyen T Q, Dante M, Heeger A J 2007 *Science* **317** 222
- [50] Yang J, Zhu R, Hong Z, He Y J, Kumar A, Li Y F, Yang Y 2011 *Adv. Mater.* **23** 3465
- [51] Chou C H, Kwan W L, Hong Z, Chen L M, Yang Y 2011 *Adv. Mater.* **23** 1282
- [52] Sun X W, Zhao D W, Ke L, Kyaw A K K, Lo G Q, Kwong D L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 053303
- [53] Tvingstedt K, Andersson V, Zhang F, Inganäs O 2007 *Appl. Phys. Lett.* **1** 123514
- [54] Dou L T, You J B, Yang J, Chen C C, He Y J, Murase S, Moriarty T, Emery K, Li G, Yang Y 2012 *Nature Photonics* **6** 180
- [55] Hadipour A, Boer B D, Bolm P W M 2008 *Org. Electron.* **9** 617
- [56] Moet D J D, Bruyn P D, Kotlarski J D, Blom P W M 2010 *Org. Electron.* **11** 1821
- [57] Moet D J D, Bruyn P D, Blom P W M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 153504
- [58] Ameri T, Dennler G, Lungenschmied C, Brabec C J 2009 *Energy & Environmental Science* **2** 347
- [59] Dennler G, Scharber M C, Ameri T, Denk P, Forberich K, Waldauf C, Brabec C J 2008 *Adv. Mater.* **20** 579
- [60] Namkoong G, Boland P, Lee K, Dean J 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 124515
- [61] Boland P, Lee K, Dean J, Namkoong G 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94** 2170
- [62] Guo X Y, Liu F M, Meng B, Xie Z Y, Wang L X 2010 *Org. Electron.* **11** 1230
- [63] Guo X Y, Liu F M, Yue W, Xie Z Y, Geng Y H, Wang L X 2009 *Org. Electron* **10** 1174
- [64] Liu F M, Shao S Y, Guo X Y, Zhao Y, Xie Z Y 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94** 842
- [65] Zhang X F, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J, Li Y, Wu C Y, Chen Y L 2008 *Optoelectronics, Laser* **19** 1016 (in Chinese) [张馨芳, 徐征, 赵谔玲, 张福俊, 李妍, 吴春瑜, 陈跃宁 2008 光电子·激光 **19** 1016]
- [66] Cai W Z, Gong X, Cao Y 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94** 114

Research review on forced convection

Progress in the blend stacked structure of organic solar cells^{*}

Yu Huang-Zhong[†]

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

(Received 7 May 2012; revised manuscript received 15 August 2012)

Abstract

Organic solar cells have received extensive attention due to their light weight, low cost, flexible. Because a single organic material absorbs only part of the sun light, laminated structure of solar cell, consisting of different absorption band gaps of organic material through the middle connecting layer, can both cover a larger part of the solar flux, and improve the circuit voltage or short circuit current of the solar cells. In this paper, the recent progress of the blend laminated structure polymer solar cells is summarized. Structures, principles and performances of a variety of laminated organic solar cells are introduced. The present status of research and existing problems of the blend laminated structure polymer solar cells are described, which provides valuable reference for the study of high-performance organic solar cells.

Keywords: organic solar cells, stacked, the blend structure, progress

PACS: 72.40.+w, 72.80.Le, 73.50.Pz, 73.61.Wp

DOI: 10.7498/aps.62.027201

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61176061), the Foundation of State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University Of Technology (Grant No. 2010KB20), and the Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 0907K5).

[†] Corresponding author. E-mail: hzhyu@scut.edu.cn