

有机太阳能电池的研究进展*

杨学良 邓金祥[†]

(北京工业大学应用数理学院 北京 100022)

摘要 能量转化效率低是有机太阳能电池实现商业化生产的一个瓶颈,因此,制备高性能太阳能电池的关键之一是提高能量转化效率(η_p),文章介绍了有机太阳能电池的工作原理,论述了目前有机太阳能电池的研究现状,重点从提高有机太阳能电池的开路电压(V_{oc})、短路电流(I_{sc})、光电转换效率(η_{EOE})和填充因子(FF)等几方面分析总结了提高有机太阳能电池能量转化效率的几种有效途径,并简要阐述了有机太阳能电池稳定性的研究进展。

关键词 半导体物理学,有机太阳能电池,能量转换效率

Organic solar cells

YANG Xue-Liang DENG Jin-Xiang[†]

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract One of the key factors in the fabrication of high performance solar cells is improving the energy conversion efficiency. Lower conversion efficiency is a bottle-neck for the commercial production of organic solar cells. We present the basic principles of organic photovoltaic devices and current research progress. In particular, several effective ways for enhancing the efficiency of organic solar cells, such as improving the open circuit voltage, short circuit current, photoelectric conversion efficiency, and fill factor, are analyzed and summarized. The stability of organic solar cells is also discussed.

Keywords semiconductor physics, organic solar cells, energy conversion efficiency

1 引言

随着煤、石油、天然气等传统能源逐渐耗尽,又由于使用传统能源排放出大量二氧化碳造成的温室效应给人们的生活环境带来诸多不良影响,开发新型清洁、环保的绿色能源成为全球各界关注的热点,太阳能由于具有取之不尽、用之不竭这一突出优点,且兼具绿色能源的特点,近年来被人们大量开发利用。人们对太阳能的利用可以追溯到1938年,法国物理学家A. E. Becquerel发现,当光照射到一种带有电极的半导体材料上时产生了光生伏特效应,即“光伏效应”。1954年,美国贝尔实验室研制出第一块光电转换效率为6%的单晶硅太阳能电池^[1],引起了人们的关注,从此人们对太阳能电池进行了大量研究,主要有硅系太阳能电池^[2]的单晶硅、多晶硅、非晶硅

太阳能电池,半导体化合物太阳能电池,染料敏化太阳能电池等。然而,它们因制作工艺复杂、成本高等缺点而显得美中不足。有机半导体材料以其原料易得、价格低廉、质量轻、可塑性强、制备工艺简单、可大面积成膜、环境稳定性高以及光伏效应良好等优点,近年来倍受人们关注。标志有机太阳能电池出现的是1958年美国加利福尼亚大学的David Kearns和Melvin Calvin^[3]将镁酞菁(MgPc)染料夹在两个功函数不同的电极之间,在光的照射下,接通两极的外电路即产生了电流。在此光电转化器件中,由于镁酞菁染料和两个功函数不同的电极接触属于肖特基接触,因此这种结构的电池就是最初的“肖特基有机

* 北京市自然科学基金(批准号:4102014)、北京市人才强教深化计划资助项目

2012-04-06 收到

[†] 通讯联系人。Email:jdeng@bjut.edu.cn

太阳能电池”。然而在这个器件上,只观测到了200mV的开路电压,能量转化效率也非常低.提高有机太阳能电池的能量转化效率,制备高性能的有机太阳能电池,从而实现大规模推广应用,一直都是科研工作者追求的目标.本文首先介绍了太阳能电池的原理和表征参数,论述了目前有机太阳能电池的研究进展,并重点论述了提高有机太阳能电池效率的几种途径,最后简要介绍了有机太阳能电池稳定性的研究近况.

2 太阳能电池的工作原理和表征参数

太阳能电池的工作原理以“光伏效应”为基础,即半导体材料吸收光能量后内部产生电子-空穴对,它们在内建电场的的作用下发生分离,且各自被相应电极收集,并产生电动势.理想太阳能电池的工作原理^[4]可以用恒流源、理想二极管和电阻三个元件并联的等效电路来表示(见图1),当入射光照射到太阳能电池上时,经由恒流源G产生的光电流 I_L ,一部分提供给二极管D使用(I_D),另一部分则供给回路中负载总电阻 R_s 使用(I_s).基于二极管的特征曲线图,通常在光照下得到太阳能电池工作的 $I-V$ 特性曲线如图2所示.

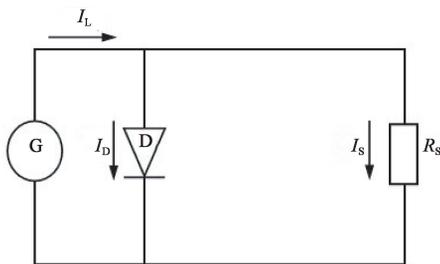


图1 理想太阳能电池工作的等效电路

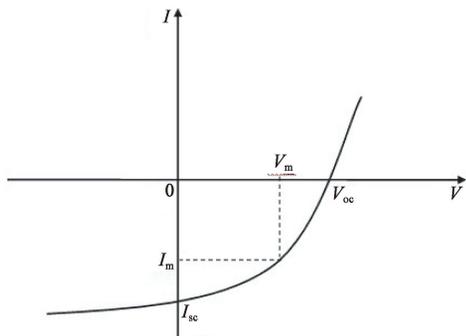


图2 光照下太阳能电池的 $I-V$ 特性曲线

表征太阳能电池的参数有:

(1)开路电压 V_{oc} :当太阳能电池的外接电路处于开路状态时,即图2中 $I-V$ 特性曲线上 $I=0$ 时的电压值;

(2)短路电流 I_{sc} :当太阳能电池外接电路的总电阻为零时,即图2中 $I-V$ 特性曲线上 $V=0$ 时的电流值;

(3)填充因子 FF :填充因子 FF 定义为光电池能够提供的最大功率与 I_{sc} 和 V_{oc} 的乘积之比,对有机太阳能电池而言, FF 代表电池对外所能提供的最大输出功率的能力大小,它是反映太阳能电池质量的重要光电参数之一.根据以上定义, FF 的表达式为

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}, \quad (1)$$

式中 P_{max} 为电流在负载上的最大输出功率, I_m 和 V_m 分别为电池取最大功率时所对应的电流和电压;

(4)外量子效率EQE^[5]:外量子效率(EQE)又被称为光电转换效率(IPCE),它代表注入一个光子时,光电流所能取出的最多电子数.其表达式为

$$EQE = \frac{N_{electrons}}{N_{photos}} \times 100\% \\ = 124000 \times \frac{I_{sc} (\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})}{P_{in} (\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}) \lambda (\text{nm})}, \quad (2)$$

式中EQE为外量子效率, N_{photos} 为注入的光子数, $N_{electrons}$ 代表取出的电子数, λ 为入射光的波长, P_{in} 为入射光的功率.有机太阳能电池的光电转换效率(IPCE)又可以分解为^[6]:

$$\eta_{EQE} = \eta_A \times \eta_{ED} \times \eta_{CC}, \quad (3)$$

式中 η_A 是材料吸收光子的效率, η_{ED} 是所有未复合的光生激子扩散到结区的效率, η_{CC} 是激子分离后生成的自由载流子传输至各自电极的效率;

(5)能量转化效率 η_p ^[7]:太阳能电池的能量转化效率 η_p 为最大输出功率 P_{out} 与单位面积入射光能量 P_{in} 的比值,其表达式为

$$\eta_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_m \times I_m}{P_{in}} = \frac{(IV)_{max}}{LA} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{LA}, \quad (4)$$

其中 P_{out} , P_{in} 分别为器件的最大输出功率和单位面积入射光能量, L 为光照强度, A 为有效面积.

3 有机太阳能电池能量转化效率(η_p)的研究

能量转化效率(η_p)作为表征太阳能电池性能优良的一个综合性参数,直接影响到太阳能电池在实际生活中的推广应用,特别是对于有机太阳能电池,其较低的能量转化效率仍然是其实现商业化生产的

一个瓶颈. 近些年,许多科研工作者致力于这方面的研究,2010年11月30日在 *PV magazine* 上的一篇报道称,经由美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)认证, Konarka 技术公司研制的有机光伏(OPV)太阳能电池达到了创记录的 8.3% 能量转换效率(η_p). 这是 NREL 所记录的世界有机光伏太阳能电池的最高转化效率,这使商业化生产低成本、高效率和大规模应用有机太阳能电池成为可能. 然而,与硅基太阳能电池相比,有机光伏太阳能电池的能量转换效率仍然较低,但是其低成本优势暗示了它在光伏行业的应用潜力,因此提高有机太阳能电池的光电转换效率对于太阳能的利用有重要意义. 近年来,科研人员主要从以下几个方面来提高其能量转化效率(η_p).

3.1 提高电池的开路电压(V_{oc})

由(4)式可知,开路电压作为表征太阳能电池性能的重要参数之一,它直接影响到能量转化效率(η_p). 为此,通过提高开路电压来提高有机太阳能电池的能量转化效率是一种有效的途径. 一直以来,对开路电压的解释没有统一说法. 最初制备的金属-绝缘体-金属(MIM)结构薄膜太阳能电池显示,开路电压只和两种金属电极的功函数之差有关^[8,9]. 这样,电池阴极材料的功函数越低,阳极材料功函数越高, V_{oc} 将越大. 2003年, V. D. Mihailetschi 等^[8]分别以几种功函数不同的金属(Ca, Ag, Al 和 Au 等)作为阴极材料,以氧化铟锡(ITO)作为阳极材料制备了活性层为 OC₁C₁₀-PPV/PCBM 的电池器件,对比后发现,功函数最低的金属 Ca 作为电极时 V_{oc} 最大,且 V_{oc} 与阴阳两电极材料的功函数之差呈线性关系. 2006年, G. Li 等^[10]用有机物 PEDOT:PSS (功函数为 5.0eV)作为阳极 ITO(功函数为 4.7eV)的修饰层以提高阳极功函数,发现开路电压增加了 0.2V. 然而早在 1986年, C. W. Tang^[11]以酞菁衍生物(CuPc)作为电子给体材料和四羧基萘衍生物(PV)作为电子受体材料,首次制备结构为 ITO/CuPc/PV/Ag 的双层异质结太阳能电池以及后来出现的体异质结太阳能电池^[12-14]. 对此, MIM 模型便不能准确地解释电池的开路电压. 解释开路电压的另一种模型为:开路电压的大小取决于施主材料的最高被占满轨道(HOMO)和受主材料的最低未被占满轨道(LUMO)的能级差,即(HOMO-LUMO)^[15-17]. 因而,要求电极与有机活性层之间的接触为欧姆接触,器件的活性层应由电离能较小的施主材料和电子亲和能较大的受主材料构成. 2002

年, T. Aernouts 等^[18]在透明电极 ITO 与有机施主材料之间插入一适当厚度的中间层 PEDOT:PSS,以减少器件内在的串联电阻,增加并联电阻,从而提高 V_{oc} 值,将能量转换效率提高到 3.0%. 2007年, Y. Kinoshita 等^[19]在 HOMO 为 5.0eV 的并五苯(pentacene)和 C₆₀之间插入一层 HOMO 为 5.1eV 的 CuPc 或 ZnPc,构成 ITO/pentacene/CuPc 或 ZnPc/C₆₀/BCP/Ag 有机太阳能电池器件,形成 pentacene/C₆₀ 和 CuPc 或 ZnPc/C₆₀ 异质结,研究发现, V_{oc} 增加的值和 n-型材料的 LUMO 能级与 p-型材料的 HOMO 能级差增加的值相一致,能量转换效率达到 2.04%. 2010年, M. F. Lo 等^[20]总结前人的研究结果,将解释开路电压(V_{oc})的两种模型很好地统一起来. 通过制备活性层为 CuPc/C₆₀ 的异质结太阳能电池,用不同厚度的电极修饰层 CsF 和 MoO₃ 分别改变阳极和阴极的功函数,使两电极的功函数差可以在 -4.0eV 到 +2.4eV 之间改变. 结果发现,两电极功函数差在 -3eV 到 0eV 区间, V_{oc} 呈线性变化,这可以用 MIM 模型很好地解释;但当两电极功函数差在 -3-0eV 之外的区域时, V_{oc} 达到最大饱和电压值而不改变,这种现象又与和能级差(HOMO-LUMO)有关的模型相吻合. 另外,2009年, S. L. Lai 等^[21]通过在异质结 CuPc/C₆₀ 之间插入电离势(I_p)比 p 型材料大、电子亲和能比 n 型材料小的不同有机物染料层,可以提高施主与受主界面之间激子的分离率,从而提高电池的 V_{oc} . 研究表明,电离势(I_p)越高,开路电压越大,这与以前研究的形成开路电压的机制有所不同,但其原因仍不得而知. 围绕提高开路电压来提高有机太阳能电池的能量转化效率仍在不断探索,进一步得到开路电压的精确解释仍然是理论上的关键.

3.2 提高电池的短路电流(I_{sc})和光电转换效率(η_{EQE})

由(4)式还可以看出,短路电流为另一个直接决定太阳能电池能量转化效率的因素. 当光入射到有机太阳能电池上时,在施主材料中产生电子-空穴对,即激子,激子扩散到施主和受主材料形成的界面结区,在内电场作用下,分离成自由电子和自由空穴,然后这些分离了的自由电子和自由空穴分别被阴极电极和阳极电极所收集,在外电路中就会形成电流. 从这一太阳能电池工作的过程来看,短路电流 I_{sc} 和有机活性层材料对光的吸收率、激子扩散到界面的效率、激子的分离率及电极处电子空穴被阴极和阳极的收集率等有关^[9]. 由(3)式可见,这些因素

也即为光电转换效率 η_{EQE} 的决定因素。

人们可以通过增加有机活性层的厚度来增大有机物对入射光子的吸收率。但是,激子在有机物中的扩散距离很有限(小于 10nm)^[22,23],有机物中载流子的迁移率往往较低,增加活性层的厚度不利于激子扩散和自由电荷传输。同时,增加活性层的厚度也会使器件本身的串联电阻增大和并联电阻减小,从而降低短路电流和填充因子。为了实现有机活性层对入射光充分吸收,近些年,研究人员通过改变器件结构来增加短路电流。根据光子能量与光波波长关系式:

$$E = \frac{1240}{\lambda}, \quad (5)$$

式中 E 的单位为 eV,波长 λ 单位为 nm。由此可知,对于半导体材料能带隙宽度大,吸收光的波长靠近紫外区;能带隙宽度小,吸收光波长则接近近红外区。通常有机半导体材料的能带隙宽度为 2.0eV 左右,而太阳光光谱的波长范围大多分布在近红外区(大于 700nm)。因此,为了找到和太阳光谱较匹配的有机物材料,扩大有机活性层对光的吸收范围,增加有机活性层对入射光子的吸收率 η_{A} ,人们试图寻找新的窄带隙能级的半导体材料。2000 年, S. A. Jenekhe 等^[24]用光学性质互补的聚合物材料 PPV(吸收带为 300—520nm)作为施主,另一种聚合物材料 BBL(吸收带延伸到近红外区域 740nm)作为受主,制备了 ITO/PPV/BBL/Al 有机异质结太阳能电池,能量转换效率达到了 2.0%。2005 年, A. Maria 等^[25]用一种吸收波长超过 1000nm 的 PbS 纳米晶材料作为受主,有机物 P3OT 作为施主制备的有机太阳能电池器件,能量转换效率也有显著提高。2006 年, J. Y. Kim 等^[26]通过改变器件的结构来增加短路电流(I_{sc}),在 Al 电极与有机活性层之间插入一层接收和传输电子能力较强且对吸收光有重新分布作用的 TiO_2 层,增加了体异质结中的光生载流子,从而增大了短路电流(I_{sc}),相比于没有这一层,能量转化效率提高了 50%,达到 5.0%。2007 年, M. Y. Chan 等^[27]在活性层为 CuPc/ C_{60} 的异质结中掺入吸收波长范围在 460—530nm 的红荧稀(rubrene),器件的能量转换效率达到 5.58%。2009 年, B. Verreet 等^[28]用一种能带隙较小(1.7eV)、吸收光波长延伸到近红外的有机半导体材料 SubNc 作为施主,得到 2.5% 的能量转换效率。2011 年, Y. Galagan 等^[29]在有机太阳能电池的阴极增加一层光反射层,使得通过有机活性层透射出来的光被反射回去,再次被活性层充分吸收,产生激子,能量转化

效率也有一定程度的提高。

在有机半导体材料中,激子扩散距离较短,载流子迁移率亦较小,能够使激子有效地分离并被相应的电极收集,对于短路电流的提高十分关键。通过制备施主和受主材料,形成互穿网络的体异质结太阳能电池^[12-14],产生很多施主和受主接触界面,有效地解决了激子扩散距离短这一难题。2004 年, S. Uchida 等^[30]将 CuPc 与 C_{60} 混合制备出体异质结电池,效率达到了 3.6%。2005 年, J. G. Xue 等^[31]制备的混合异质结有机太阳能电池,既克服了激子有限的扩散距离,也消除了自由电荷在传输到电极过程中所受到的缺陷阻碍作用,器件效率达到了 5.0%。为了将激子有效分离并传输到相应的电极,许多研究人员在电极与活性层之间插入有机物 BCP^[32], P3HT^[33], 金属氧化物^[34-36]作为激子阻挡层,很好地避免了活性层在热蒸镀金属电极时被损坏,同时在这层有机物上形成的缺陷态能够很好地促进电子有效传输。通过退火改变有机活性层的结晶质量^[37],改善活性层与电极接触界面之间的形貌^[38],是近年来使自由电子和空穴被相应电极有效收集常用到的方法。为增大短路电流,新的器件制备技术也是层出不穷。2004 年, B. Pradhan 等^[39]用一种新的静电自组装(electrostatic self-assembly, ESA)技术制备电池器件,通过这种新技术,器件内激子得到了很好的分离,自由电子与自由空穴也被有效地传输, I_{sc} 亦有明显增大。此外,选用载流子迁移率较大的有机物材料作为器件的活性层也是提高 I_{sc} 比较常见的方法。2006 年, N. Kopidakis 等^[40]用一种新的四臂噻吩类聚合物材料(thiophene dendrons, 4G1-nS)代替三臂噻吩类聚合物材料(3G1-1S)作为施主,由于 4G1-nS 具有更优良的载流子迁移率,因而器件的 I_{sc} 有所增加,能量转换效率为 1.3%。2009 年, H. Kageyama 等^[41]用空穴迁移率较高($10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)的非晶材料 TTPA 和 TPTPA 作为施主, C_{60} 作为受主制备电池器件,得到了 1.7% 的能量转换效率。2011 年, S. R. Cowan 等^[42]对 P3HT: PC₆₀BM 和 PCDTBT: PC₇₁BM 体异质结太阳能电池进行瞬变光电导测量(transient photoconductivity measurements),分析了激子分离与再结合的过程,发现在几微秒的时间内,施主材料中就能形成电子-空穴对,激子的分离正比于内电场,但被载流子的迁移率所限制。2011 年, Y. Yuan 等^[43]运用层压法制备有机太阳能电池器件,使受主 PCBM 结晶化,得到的能量转换效率和用传统的真空蒸镀法所

制备的电池相同(4.0%)。

3.3 提高电池的填充因子(FI)

对有机太阳能电池填充因子的研究主要集中在开路电压(V_{oc})与短路电流(I_{sc})的讨论中,(见(1)式),但仍有一些小组对其进行专项研究,通过降低器件内阴极与有机活性层之间的串联电阻和增大并联电阻^[31]来实现优化电池的填充因子是常见的方法.2008年,D. Gupta等^[44]研究发现,坐标轴第4象限电池的 $I-V$ 特性曲线如果呈凸形($d^2J/dV^2 > 0$),阴极与有机聚合物界面接触良好,串联电阻小,并联电阻大;如果呈凹形($d^2J/dV^2 < 0$),则阴极与聚合物接触界面串联电阻较大,从而填充因子较低.2011年,J. L. Wagner等^[45]用一种新的小分子有机物材料(diindenoperylene,DIP)作为施主材料,用 C_{60} 作为受主材料,制备了ITO/PEDOT:PSS/DIP/ C_{60} /BCP/Al结构的电池器件,以及以DIP作为施主材料的体异质结构器件,得到的填充因子为74%,能量转换效率为4.0%。

4 有机太阳能电池稳定性的研究

与硅系太阳能电池相比,有机太阳能电池仍存在一些不足,例如:能量转换效率低,光谱响应范围小,电池稳定性不够好等.前两方面作者在上文已作论述,这里不再赘述.由于有机半导体材料本身化学稳定性低,容易受到水和氧气分子的影响,从而会使电池的效率下降.未经封装的电池器件长期放置在空气中,电极容易被氧化,通过晶粒间界和电极的小孔洞渗透进来的氧气和水分子,会使有机活性层性能降低^[46].因此在制备有机太阳能电池时,人们通常用PEDOT:PSS来修饰阳极,阻挡氧气和水分子向有机活性层内扩散.然而PEDOT:PSS具有一定酸性,容易和有机活性层发生化学反应而降低器件的效率^[47-49].此外,热蒸发电极会导致金属原子扩散到有机活性层中,改变其半导体性质^[47].2005年,M. Glatthaar等^[48]提出倒置有机太阳能电池,得到了1.4%的能量转换效率.2008年,S. K. Hau等^[47]在倒置有机太阳能电池中,将ZnO镀在阳极的ITO上作为电子收集层,研究表明,这种倒置有机太阳能电池很好地克服了传统太阳能电池不稳定这一难点,能量转换效率为3.3%.2011年,W. H. Shim等^[50]用一种多功能材料单壁碳纳米管(single-walled carbon nanotubes,SWCNT)和ZnO共同作为倒置太阳能电池的阴极ITO修饰层,发现器件的

稳定性显著提高.

5 结束语

轻质、廉价、可塑性好的有机太阳能电池越来越被人们所关注.从肖特基有机太阳能电池、双层异质结有机太阳能电池到混合异质结有机太阳能电池,能量转换效率一直是人们研究的关键问题.本文综述了目前有机太阳能电池能量转换效率的研究进展,提高有机太阳能电池效率的几种途径,以及有机太阳能电池稳定性的研究.从目前相关报道来看,国内外研究人员在该领域已取得很大进展,但是,相对硅系太阳能电池的能量转换效率,有机太阳能电池仍较低,距离大面积商业化生产还有待时日.其关键在于有机半导体材料与无机半导体材料的导电机理不同,有机太阳能电池与无机太阳能电池的光电转化机制有所区别.因此,深入研究有机太阳能电池的能量损失机制至关重要,同时,可以借鉴无机太阳能电池的成功经验,通过增加抗反射膜和优化有机半导体材料的载流迁移率等方法来改善有机太阳能电池性能.随着进一步深入研究,有机太阳能电池有望实现大规模商业化生产.

参考文献

- [1] Chapin D M, Fuller C S, Pearson G L. *J. Appl. Phys.*, 1954, 25 (5): 676
- [2] 陈晨,贾锐,朱晨昕等. *物理*, 2010, 39(2): 123 [Chen C, Jia R, Zhu C X *et al.* *Wuli(Physics)*, 2010, 39(2): 123 (in Chinese)]
- [3] Kearns D, Calvin M J. *Chem. Phys.*, 1958, 29(4): 950
- [4] 吕红亮,张玉明,张义门. *化合物半导体器件*. 北京:电子工业出版社,2009
- [5] 乔芬. *基于聚合物的有机太阳能电池的研制与表征*. 大连理工大学博士学位论文,2009
- [6] Peumans P, Uchida S, Forrest S R. *Nature*, 2003, 425: 158
- [7] Granstrom M, Petritsch K, Arias A C *et al.* *Nature*, 1998, 395: 257
- [8] Mihailetchi V D, Blom P W M, Hummelen J C *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2003, 94(10): 6849
- [9] Brabec C J. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004, 83: 273
- [10] Li G, Chu C W, Shrotriya V *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88: 253503
- [11] Tang C W. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(2): 183
- [12] Yu G, Gao J, Hummelen J C *et al.* *Science*, 1995, 270: 1789
- [13] Dittmer J J, Lazzaroni R, Leclere P *et al.* *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2000, 61: 53
- [14] Brabec C J, Cravino A, Meissner D *et al.* *Adv. Funct. Mater.*, 2001, 11(5): 374
- [15] Brabec C J, Shaheen S E, Fromherz T *et al.* *Synthetic Metals*, 2001, 121: 1517
- [16] Scharber M C, Muhlbacher D, Koppe M *et al.* *Adv. Mater.*, 2006, 18: 789
- [17] Rand B P, Burk D P, Forrest S R. *Physical Review B*, 2007, 75: 115327

- [18] Aernouts T, Geens W, Poortmans J *et al.* The Solid Films, 2002, 403-404; 297
- [19] Kinoshita Y, Hasobe T, Murata H. Appl. Phys. Lett., 2007, 91; 083518
- [20] Jenekhe S A, Yi S J. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(17); 2634
- [21] Lai S L, Lo M F, Chan M Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 95; 153303
- [22] Halls J J M, Pichler K, Friend R H *et al.* Synthetic Metals, 1996, 77; 277
- [23] Halls J J M, Friend R H. Synthetic Metals, 1997, 85; 1307
- [24] LO M F, Ng T W, Liu T Z *et al.* Appl. Phys. Lett., 2010, 96; 113303
- [25] Maria A, Cyr P W, Klem E J D *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 87; 213112
- [26] Kim J Y, Kim S H, Lee H H *et al.* Adv. Mater., 2006, 18; 572
- [27] Chan M Y, Lai S L, Fung M K *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90; 023504
- [28] Verreet B, Schols S, Cheyons D *et al.* J. Mater. Chem., 2009, 19; 5295
- [29] Galagan Y L, Debije M G, Blom P W M. Appl. Phys. Lett., 2011, 98; 043302
- [30] Xue J G, Rand B P, Uchida S *et al.* Adv. Mater., 2005, 17(1); 66
- [31] Uchida S, Xue J G, Rand B P *et al.* Appl. Phys. Lett., 2004, 84(21); 4218
- [32] Peumans P, Forrest S R. Appl. Phys. Lett., 2001, 79(1); 126
- [33] Oh J Y, Jang W S, Lee T L *et al.* Appl. Phys. Lett., 2011, 98; 023303
- [34] Cho S W, Kim Y T, Shim W H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2011, 98; 023102
- [35] Shrotriya V, Li G, Yao Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 88; 073508
- [36] Tao C, Ruan S P, Xie G H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 94; 043311
- [37] Reyes M R, Kim L, Carroll D L. Appl. Phys. Lett., 2005, 87; 083506
- [38] Lee K H, Schwenn P E, Smith A R G *et al.* Adv. Mater., 2011, 23; 766
- [39] Pradhan B, Bandyopadhyay A, Pal A J. Appl. Phys. Lett., 2004, 85(4); 663
- [40] Kopidakis N, Michell W J, Lagemaat J V D *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89; 103524
- [41] Kageyama H, Ohishi H, Tanaka M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 94; 063304
- [42] Cowan S R, Street R A, Cho S *et al.* Physical Review B, 2011, 83; 035205
- [43] Yuan Y B, Bi Y, Huang J S. Appl. Phys. Lett., 2011, 98; 063306
- [44] Gupta D, Bag M, Narayan K S. Appl. Phys. Lett., 2008, 92; 093301
- [45] Wagner J, Gruber M, Hinderhofer A *et al.* Adv. Funct. Mater., 2010, 20; 4295
- [46] Zhao D W, Liu P, Sun X W *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 95; 153304
- [47] Hau S K, Yip H L, Baek N S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2008, 92; 253301
- [48] Glatthaar M, Niggemann M, Zimmermann B *et al.* Thin Solid Films, 2005, 491; 298
- [49] Zhao D W, Tan S T, Ke L *et al.* Solar Energy Materials & Solar Cells, 2010, 94; 985
- [50] Shim W H, Park S Y, Park M Y *et al.* Adv. Mater., 2011, 23; 519