

有机太阳能电池的工作原理 及应用前景展望*

陈中海 周颖

(重庆市杨家坪中学 重庆 400039)

(收稿日期:2019-07-31)

摘要:有机太阳能电池的制备工艺简单、能耗少、柔性可卷曲、制造成本较低,具有广阔的应用前景,因此对有机太阳能电池研究,一直是国际上的学术热点.本文从有机太阳能电池的结构、工作原理、应用前景展望等方面对有机太阳能电池进行了简要的介绍,希望对物理同仁、中学生了解前沿科技有所帮助.

关键词:有机太阳能电池 光电转换原理 效率 展望

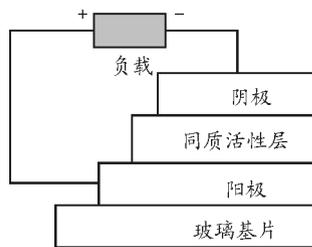
当今世界,化石燃料的逐渐枯竭和生态环境的不断恶化,迫使人寻找新的可再生的洁净能源,太阳能具有取之不尽、清洁无污染等特点,成为人类首选的洁净能源.太阳能电池也被称为光伏电池(photovoltaic cells,简称PVC),是将光能直接转换成电能的装置,其基本原理是基于光生伏打效应(photovoltaic effect).传统的太阳能电池主要是以半导体材料为基础,利用光电材料吸收光能后发生光电转换反应.目前市场上,使用较为广泛的是无机太阳能电池,如晶体硅太阳能电池与无机化合物太阳能电池,但其生产成本较高,且生产过程易对环境产生有毒污染.

与无机太阳能电池相比,有机太阳能电池(Organic solar cell)是在高真空状态下采用热蒸镀有机薄膜的方法制成的器件.由于有机材料价格低廉、熔点低、电子结构易调,使得有机太阳能电池的制备工艺简单、能耗少、制造成本较低.由于有机太阳能电池具有广阔的应用前景,因此对有机太阳能电池以及光伏效应机理等的研究,一直是国际上的学术热点,而研究的重点则是如何提高有机太阳能电池的能量转换效率,或器件的量子效率(即光子→

电子的转换效率).

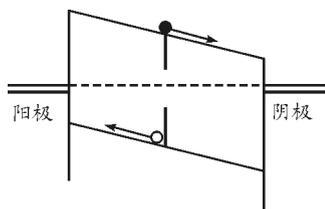
1 有机太阳能电池的工作原理

有机太阳能电池是以具有光敏性质的有机物作为半导体材料,以光伏效应产生光生电压,进而形成电流.往往具有共轭结构的有机材料均有导电性,如酞菁化合物、卟啉、菁等.有机太阳能电池薄膜的厚度大约在几十纳米到几百纳米之间,器件的制备通常是在高真空状态下,采用热蒸镀方式将阳极材料ITO(锡钢氧化物)、有机薄膜活性层、金属铝阴极,热蒸镀在柔性衬底上.根据活性层有机薄膜材料的不同,可分为单层同质有机太阳能电池和双层异质有机太阳能电池,器件的结构和能级图分别如图1和图2所示.



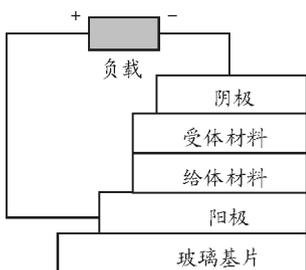
(a)单层太阳能电池结构

* 2015年普通高中教育教学改革研究课题(重大课题10号).

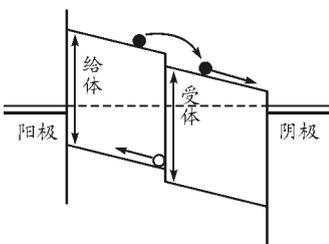


(b) 单层太阳能电池能级示意图

图1 单层有机太阳能电池工作原理



(a) 双层太阳能电池结构



(b) 双层太阳能电池能级示意图

图2 双层异质有机太阳能电池工作原理

有机太阳能电池与无机太阳能电池的光电转化原理是相似的^[1], 区别在于无机太阳能电池是在硅材料基础上制作成的半导体器件, 而有机太阳能电池是利用有机材料作为活性层, 通过光电效应把光能转换成电能的光伏半导体器件^[2]. 单层有机太阳能电池结构如图 1(a) 所示, 其结构为玻璃基片 / 电极 / 同质活性层 / 电极, 其由一层同质单极性的有机薄膜半导体材料嵌于阴、阳极之间而形成的电池器件, 图 1(b) 是器件的能级示意图, 光电转化过程如图 3 所示^[3].

图 3 中, HOMO 是有机材料的最高占据轨道, LUMO 是有机材料的最低空置轨道, φ_{ITO} 和 φ_{Al} 分别表示阴阳两个电极的功函数 (指要使电子立即从固体表面中逸出, 所必须提供的最小能量), $h\nu$ 表示入射光子的能量, Vacuum level 表示真空能级, E_g 表示 HOMO 与 LUMO 间的能隙. 有机分子吸收光子后, 产生激子 (电子-空穴对), 电子占据较高能级

的 HOMO 轨道, 而与之匹配的空穴占据较低能级的空轨道 LUMO. 在短路情况下, 阴、阳电极功函数的不同, 致使在有机薄膜层中产生内建电场, 最终使得有机层的能带发生倾斜, 如图 1(b)、图 2(b) 所示. 因此, 在单层有机太阳能电池中, 使激子解离为电子和空穴的主要驱动力, 来源于阴阳两个电极功函数差异所产生的内建电场. 光照产生的激子, 在内建电场的作用下解离成电子和空穴, 迁移到两个电极, 经过外电路形成电流, 供负载使用.

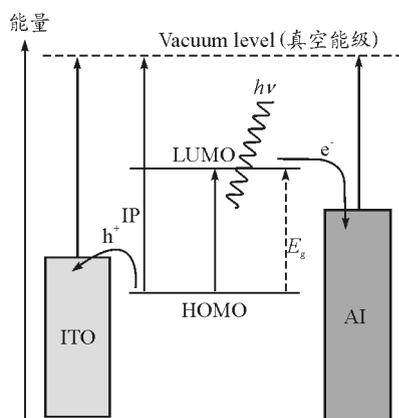


图3 有机太阳能电池光电转换原理示意图

双层异质有机太阳能电池是由给体 (Donor, 简称 D) 材料和受体 (Acceptor, 简称 A) 材料嵌于两个电极间形成的平面型 D-A 界面半导体器件^[4], 如图 2(a) 所示, 其结构为玻璃基片 / 阳极 / 给体材料 / 受体材料 / 金属阴极. 有机异质太阳能电池通常是由两种不同的有机半导体材料构成, 一种是 n 型半导体有机材料即电子型材料, 另一种是 p 型半导体有机材料即空穴材料^[3], 其光电转换过程与单层同质有机太阳能电池类似. 当光照射在 p-n 结上时, 引起光生伏打效应, 进而将光能转化成电能. 若入射光的能量大于或等于有机半导体材料的能隙时, 有机半导体将吸收入射的光子, 使给体上的电子从 HOMO 轨道跃迁到 LUMO 上, 从而产生非平衡电子-空穴 (e-h) 对, 并不是自由载流子, 在库仑力的作用下电子-空穴对被束缚在一起形成激子, 而产生的激子必须分离成自由载流子才能产生光电流. 在扩散的作用下, 产生的激子将运动到受体和给体的界面, 在内建电场的作用下, 激子将会分离成空穴和电子, 如图 2(b) 所示. 电子和空穴朝着相反的方向

运动,最终在 n 区聚集大量的负电荷,在 p 区聚集大量的正电荷,使得 p 区的电势明显高于 n 区的电势低,于是就在 $p-n$ 结内产生与内建电场方向相反的光生电动势,即光伏效应.产生的电子和空穴通过不同的运输形式到达相应的电极,空穴通过给体材料层达到电池的正极,电子经过受体材料层到达电池的负极,最后经过电路形成电流.

2 有机太阳能电池的应用前景展望

有机太阳能电池虽然是一个全新的领域,但它的发展历史跟硅基太阳能电池的历史差不多.到目前为止,有机太阳能电池的光电转换效率虽然没有传统硅基太阳能电池的效率,但由于它生产成本低廉,用途广,因而具有巨大的潜在商业应用价值^[5].有机太阳能电池具有以下优点:

- (1) 与无机太阳能电池相比,有机太阳能电池毒性小,不易对环境造成污染;
- (2) 有机材料成本低、功能易调、柔韧性及成膜效果好;
- (3) 有机太阳能电池加工过程相对简单,可低温操作;
- (4) 有机太阳能电池电子结构可调,便于制作大面积柔性器材,因而有望给便携式手表、计算器、

半透光式充电器、玩具、柔性可卷曲等设备供电.

随着新材料的不断开发和相关技术的发展,有机太阳能电池逐渐显示出诱人的市场前景.因此,具有制造工艺简单、成本低廉、可以卷曲、适宜大面积制造的有机太阳能电池,越来越受人们的广泛关注,如果能在光电转换效率上取得进一步的突破,今后有机太阳能电池将会有很大的应用空间.

参考文献

- 1 刘鉴民. 太阳能利用原理 技术工程[M]. 北京:电子工业出版社,2010. 15 ~ 18
- 2 Y. W. Kim, M. L. Monroe, et al. Optimization of organic bi-layer solar cell through systematic study of anode treatment and material thickness[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2008, 25(5): 1 036 ~ 1 039
- 3 S. Park, S. Beaupré, et al. Bulk heterojunction solar cells with internal quantum efficiency approaching 100% [J]. Nature Photonics, 2009, 3(5): 297 ~ 302
- 4 Y. Zhao, Z. Xie, C. Qin, et al. Enhanced charge collection in polymer photovoltaic cells by using an ethanol-soluble conjugated polyfluorene as cathode buffer layer[J]. Sol. Energy Mater. and Sol. Cells, 2009, 93(5): 604 ~ 608
- 5 林鹏, 张志峰, 熊德平, 等. 有机太阳能电池研究进展[J]. 光电子技术, 2004, 24(1): 55 ~ 60

(上接第 117 页)

- (4) 实验测量. 按计算结果来垫高外轨,用传感器实验检验侧压力的值.
- (5) 现场调查. 在铁路弯道上,与技术员交流信息.
- (6) 学生计算. 按现实中数据计算弯道外轨需要垫高的高度.
- (7) 现场调查. 技术员现场测量外轨垫高高度检验学生计算结果.



图5 西班牙一列火车超速转弯脱轨

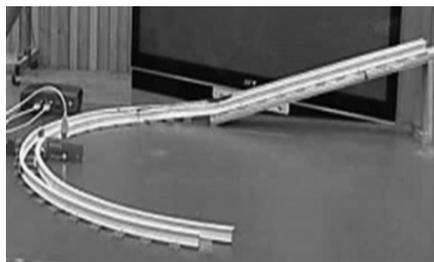


图6 模拟火车转弯

参考文献

- 1 杨向东. 以科学探究为例看素养与知识的关系[J]. 基础教育课程, 2018(2): 19 ~ 23
- 2 崔允灏. 如何开展指向学科核心素养的大单元设计[J]. 北京教育, 2019(2): 11 ~ 15
- 3 教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版)[S]. 北京:人民教育出版社, 2018