

薄膜太阳能电池研究进展

孔继川 缪娟

(河南理工大学物理化学系, 河南 焦作 454000)

摘要 薄膜太阳能电池是缓解能源危机的新型光伏器件。综述了硅基薄膜太阳能电池、CdTe 薄膜太阳能电池、CIS (CIGS) 薄膜太阳能电池、 TiO_2 薄膜太阳能电池、ZnO 薄膜太阳能电池和有机薄膜太阳能电池的研究现状, 展望了太阳能电池的发展趋势。

关键词 薄膜太阳能电池 硅 CdTe CIS TiO_2 ZnO 有机

Progress in Research on Film Solar Cell

Kong Jichuan Miao Juan

(Physics and Chemistry Department Henan Polytechnic University Henan Jiaozuo 454000)

Abstract Film solar cell, a new kind of photovoltaics to mitigate the energy sources crisis, was indicated. Current status of research for film solar cells such as Si, CdTe, CIS (CIGS), TiO_2 , ZnO and organics was reviewed. Future directions for solar cell were described.

Keywords film solar cell Si CdTe CIS TiO_2 ZnO organics

随着煤、石油、天然气等能源日益枯竭和环境污染日益加剧, 人们迫切需要寻找清洁可再生新能源。作为地球无限可再生的无污染能源——太阳能的应用日益引起人们的关注, 将太阳能转化为电能的太阳能电池的研制得到了迅速发展。目前以商品化的晶体硅太阳能电池的光电转化效率最高, 但受材料纯度和制备工艺限制, 成本高, 很难再提高转化效率或降低成本。薄膜太阳能电池只需几 μm 的厚度就能实现光电转换, 是降低成本和提高光子循环的理想材料^[1]。本文综述了各种薄膜太阳能电池的研究现状, 对薄膜太阳能电池的发展趋势进行了展望。

1 硅薄膜太阳能电池

开发太阳能电池的两个关键问题是提高效率和降低成本^[2]。单晶硅太阳能电池是在厚度 350–450 μm 的高质量硅片上制成, 受单晶硅价格及相应繁琐的制备工艺影响, 其价格居高不下, 为节省高质量材料, 发展了薄膜太阳能电池, 其中非晶硅薄膜太

阳能和多晶硅薄膜太阳能电池是其中典型代表。

1.1 非晶硅薄膜太阳能电池

非晶硅薄膜太阳能电池是用非晶硅半导体材料在玻璃、特种塑料、陶瓷、不锈钢等为衬底制备的一种薄膜电池。非晶硅薄膜太阳能电池的制备方法有反应溅射法、低压化学气相沉积法 (LPCVD)、等离子体增强化学气相沉积法 (PECVD)。为生产高质量的非晶硅, 对非晶硅材料制备方法也进行了研究, 等离子体化学气相沉积法特别是 RF 辉光放电法已经广泛应用^[4], 并提出 H_2 稀释 PECVD 法。非晶硅薄膜成本低是一种很好的太阳能电池材料, 但由于其光学带隙 (1.7 eV) 与太阳光光谱不匹配, 所以限制了非晶硅太阳能电池的转化效率并且其光电效率会随光照时间增加而衰减^[3]。利用反应原料气 H_2 稀释 SiH_4 在不同衬底上制成的非晶硅薄膜经过不同电池工艺分别得到单结电池和叠层电池, 可以解决上述问题。Sang – Kyun Kim 等^[5]利用 H_2 稀释 PECVD 法在低纯度硅片上制备出 a-Si:H/c-Si 异质结太阳能电池转化

收稿日期: 2008-05-09

基金项目: 河南省自然科学基金 (编号: 0511050200) 和河南理工大学青年基金 (Q2008-15) 资助

作者简介: 孔继川 (1979~), 男, 硕士, 讲师, 从事功能材料研究

效率达到 12 %。非晶硅太阳能电池具有高的光电转换效率,但光疲劳效应严重制约了其发展。

1.2 多晶硅薄膜太阳能电池

多晶硅薄膜太阳能电池是将多晶硅薄膜生长在低成本衬底材料上,用相对薄的晶体硅层作为太阳能电池的激活层,不仅保持了晶体硅太阳能电池的高性能和稳定性,而且材料的用量大幅下降,成本明显降低。多晶硅薄膜太阳能电池的制备方法有化学气相沉积法、液相外延法、金属诱导晶体法、非晶 Si 薄膜固相晶化法、激光晶化法和等离子喷涂法。目前多晶硅薄膜太阳能电池的转化效率接近单晶硅太阳能电池的转化效率。如日本三菱公司在 SiO_2 衬底上制备的多晶硅薄膜太阳能电池光电效率达 16 %。德国费来堡太阳能研究采用区熔再结晶技术制得多晶硅电池转化效率达 19%^[7]。

在硅薄太阳能电池中除了上述两种结构外,非晶硅薄膜(a-Si)和多晶硅薄膜(p-Si)串联的太阳能电池也是很有发展前景的一种电池结构。另外具有过度层结构的微晶硅薄膜太阳能电池($\mu\text{c-SiH}$)不但稳定性好,而且光电转换效率高。E. Finger等^[8]利用热丝化学气相沉积(Hot-Wire CVD)制备缓冲层得到的微晶硅单质结太阳能电池转换效率达 10.3%。Y. Wang等^[9]对 $\mu\text{c-SiH}$ 稳定性研究发现,利用 HW CVD 制备过度层后的微晶硅太阳能电池在光照 1 000 h 后效率衰减小于 10%,呈现出良好的稳定性。

2 多元化合物薄膜太阳能电池

硅基薄膜太阳能电池的转化效率提高潜力有限,近年来开发出了以 CdTe、CuInSe 和 GaAs 等为代表的新型无机多元化合物薄膜太阳能电池。

2.1 CdTe 薄膜太阳能电池

CdTe 薄膜太阳能电池属于多晶薄膜太阳能电池,由于 CdTe 基电池结构简单,成本相对较低,成为近年来国内外研究的热点。CdTe 存在自补偿效应,制备高电导率同质结很困难,实用的电池多为异质结构。CdS 的结构与 CdTe 相同,晶格常数差异小,是 CdTe 基电池最佳的窗口材料。CdTe/CdS 薄膜太阳能电池制备技术主要有真空蒸镀法、溅射法、电化学沉积法等。目前 CdTe/CdS 薄膜太阳能电池的实验室转化率已达到 16 %^[6]。关于 CdTe 薄膜在太阳

能电池中的应用, Alessio Bosio 等^[10]对制备高效 CdTe/CdS 太阳能电池的方法进行了综述,指出 CdTe 薄膜技术是大面积组件产品的关键。Lianghuan Feng 等^[11]探讨了生产大面积 CdTe 薄膜太阳能电池的关键技术:认为多晶 SnO_2 薄膜制备;室温下刻蚀 CdTe 制备出掺铜的背电极及低的掺铜浓度是制备稳定、高效、大面积 CdTe 太阳能电池的关键。随着实验室研究和工业生产工艺研究的不断探索, CdTe 基薄膜太阳能电池有望成为市场主角。

2.2 CIS(CIGS)薄膜太阳能电池

CuInSe_2 是一种三元化合物,是直接带隙的半导体材料,常温下带隙宽度为 1.0 eV,光吸收系数很大(大于 10^4),0.5 μm 厚的 CuInSe_2 可以吸收 90% 的太阳能光子,所以薄膜不需很厚,可以降低成本。由于太阳光的最佳禁带宽度为 1.45 eV 所以在 CuInSe_2 上掺杂其它元素可以使其接近最佳禁带宽度。目前主要用 Ga 代替部分 In,用 S 代替部分 Se 来实现。同时可以调整 In/Ga 的比值使材料带隙宽度覆盖 1.05–1.7 eV,从而大大提高 CuInSe_2 转化效率。K. Ramathanan 等^[12]制备出了转化效率达 19% (CuInSe, S)₂ 太阳能电池。M. A. Contreras^[13]和 Miguel A^[14]在不同条件下得到 Cu(In, Ga)Se_2 太阳能电池的转化效率分别为 19.5% 和 20%,几乎和单晶硅太阳能电池转化效率相当。CIS(CIGS)薄膜太阳能电池的制备方法有:真空蒸镀法、溅射法、电化学沉积法等。其中电沉积硒化法有其适合工业生产的特点。该法主要分两个阶段:首先用电沉积法得到 CIS 前驱体,然后在 Se 或 H_2Se 气体氛围中热处理。S. Jost 等^[15]详细研究了 Se 的浓度对电化学沉积制备 CuInSe_2 薄膜的影响。Donglin Xu^[16]用硒化电沉积法制备太阳能电池用 Cu(In, Ga)Se_2 薄膜,并研究了其特征。CIS(CIGS)薄膜太阳能电池被认为是一种很有发展前途的太阳能电池,但目前的研究还是处于实验阶段,如何进一步提高转化率,降低成本,探索新的工艺条件,提高制作过程的可重复性,寻找 CIS(CIGS)可替代新的廉价、无毒元素来掺杂等问题有待解决。

3 纳米晶薄膜太阳能电池

纳米晶薄膜太阳能电池是人们在探索电池制备新工艺、新材料和电池薄膜化过程中发展起来的一种新型光伏器件,受到了国内外研究者重视。

3.1 TiO_2 基薄膜太阳能电池

TiO_2 是一种价格便宜、无毒、稳定且抗腐蚀性良好的半导体材料。纳米尺度的 TiO_2 为宽禁带半导体,对太阳光的吸收率很低。需要对 TiO_2 薄膜进行敏化。一是与窄禁带半导体复合。如 Zhaoyun Liu^[17] 用 SnO_2 与 TiO_2 复合制备 $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ 复合膜,并讨论了 $\text{TiO}_2:\text{SnO}_2$ 的比例对光电流的影响。二是杂质掺杂敏化。如 Sahi A^[18] 用溅射方法制备掺 N 的 TiO_2 杂化膜,其吸收光谱比 TiO_2 宽。三是用染料敏化。染料敏化纳米晶 TiO_2 薄膜太阳能电池是利用 TiO_2 纳米晶薄膜吸附无机或有机染料作为敏化剂而制备的一种新型太阳能电池。染料敏化纳米晶 TiO_2 薄膜太阳能电池以其潜在的低成本、制作工艺简单和电池制备低能耗等优势赢得了世人的关注。从 1991 年 Gratzel 教授和他的课题组获得了 7.1% 的转换效率后,于 2005 年又获得了模拟太阳光下 11% 的高的光电转化效率^[19]。目前对染料敏化纳米晶 TiO_2 薄膜太阳能电池的研究主要集中在纳米 TiO_2 多孔薄膜的制备和修饰;染料敏化剂的选择及应用;电池电解质的设计开发;对电极和导电基底材料的开发等方面。关于影响染料敏化纳米晶 TiO_2 薄膜太阳能电池的关键技术和研究现状王孔嘉等作了详细论述^[20-25]。

3.2 ZnO 纳米晶薄膜太阳能电池

ZnO 同 TiO_2 一样属于宽禁带半导体材料,研究表明 TiO_2 薄膜中存在大量的表面态,束缚电子在薄膜中传输,导致暗电流增加,降低了 TiO_2 电池的总效率^[26,27]。与 TiO_2 相比,电子在 ZnO 中的迁移率大^[28],能够减小电子在薄膜中的传输时间。并且 ZnO 的制备要比 TiO_2 简单的多,有望进一步降低电池的成本。所以自从 1994 年,Redmond 等采用钌的配合物为染料,在波长 520 nm 处成功地获得了 13% 的单色光转化效率后人们对 ZnO 纳米晶薄膜太阳能电池的研究逐渐表现出浓厚兴趣^[29-34]。2006 年 Fujihara 等^[29] 制备的 ZnO 太阳能电池实现了在全太阳光 ($\text{AM} - 1.5, 100 \text{ mW}/\text{cm}^2$) 下最高的 4.1% 的光电转换效率。然而 ZnO 电池与 TiO_2 电池相比效率偏低,其原因可归结为^[35]: ①染料敏化纳米晶 ZnO 多孔膜太阳能电池晶体颗粒粒径比 TiO_2 大,使得 ZnO 薄膜的比表面积偏小吸附染料的量减少; ②在 TiO_2 电池中, TiO_2 分子的 3d 轨道和染料配合物的电子激发态

π^* 轨道有很好的电子耦合,有利于光激发下电子向 TiO_2 的导带转移,而 ZnO 电池没有类似耦合现象,染料分子和 Zn^{2+} 结合成 $\text{Zn}^{2+} \backslash \text{dye}$ 配合物,不利于电子从激发态向 ZnO 导带转移。所以要提高 ZnO 电池的转化效率,必须开发新的制备高比表面积的 ZnO 电极技术,选择具有宽吸收光谱和性能匹配的染料并改善染料在 ZnO 中的吸附方式,防止 $\text{Zn}^{2+} \backslash \text{dye}$ 配合物形成。目前制备染料敏化 ZnO 薄膜电极的方法有手术刀和丝网印刷法、机械挤压法、化学液相沉积法、化学气相沉积、低温水热法和电沉积自组合法。前 4 种方法中 ZnO 薄膜的制备和染料敏化过程是分开的,电沉积自组合法可以一步实现制膜和染料吸附,并且通过调节自组合法沉积条件实现对薄膜厚度、形貌及染料吸附量的控制,方法便捷并有望用于大面积制膜,所以许多学者对电沉积自组合法制备染料敏化 ZnO 薄膜技术表现出了极大兴趣^[36-38]。总之,虽然 ZnO 薄膜中的电子的迁移率大,但由于电子注入和 $\text{Zn}^{2+} \backslash \text{dye}$ 的团聚等因素的影响^[39]使 ZnO 纳米晶薄膜电池的效率较低。只有不断探索该类电池的理论和应用研究,才能不断提高 ZnO 太阳能电池的光电转化效率和稳定性。

4 有机薄膜太阳能电池

有机薄膜太阳能电池是以有机物分子作为半导体材料的光伏器件。其工作过程有 3 个步骤^[40]: ①光激发产生激子; ②激子在给体/受体 (D/A) 界面分裂; ③电子和空穴的漂移及其在各自电极的收集。目前报道的该类电池主要有 3 种结构: 单质结构、双层 $p-n$ 异质结结构和 p 型 - n 型体相异质结结构。单质结构薄膜太阳能电池制备工艺简单、价格便宜,但光伏性能强烈依赖于电极的性质,并且有机物大的串联电阻使光电流降低; 双层 $p-n$ 异质结结构中 (D/A) 界面面积有限产生的光生载流子有限,光电转换效率受到限制; p 型和 n 型体相异质结结构是将 p 型和 n 型有机半导体材料进行混和而制备的光伏器件,增加了 (D/A) 界面面积,光转换效率得以提高。共轭聚合物容易与其他无机和有机材料共混制成杂化器件,并能制成特种形状、大面积、柔性器件,所以聚合物本体异质结型太阳能电池备受世人关注。目前对聚合物本体异质结薄膜太阳能电池的研究主要集中在两个方面^[41]: 一是多功能新材料的合

成开发;二是器件制造技术即薄膜制备技术的提高。聚合物薄膜太阳能电池效率受诸多因素影响^[42],如光敏层对太阳光谱响应范围,光敏层组分形貌,材料载流子迁移率和电极材料及界面等。

5 结束语

薄膜太阳能电池是缓解能源危机的新型光伏器件。太阳能电池开发和制备过程中必须考虑的两个因素是提高转化率和降低成本。而电池的薄膜化无疑是降低成本的有效途径。

目前所开发研制的薄膜太阳能电池中硅基薄膜和多元化合物薄膜太阳能电池效率较高,并部分实现了商品化,但受材料制约,与其他薄膜太阳能电池相比成本相对较高。纳米晶薄膜太阳能电池和有机薄膜太阳能电池原料易得、成本低,但目前转化效率和稳定性不够好,所以研制新的低成本光电材料,开发新的大面积薄膜电池制备工艺以提高纳米晶薄膜太阳能电池和有机薄膜太阳能电池的稳定性和光电转换效率仍是未来薄膜太阳能电池的研究热点。

参考文献

[1] Bonnet D. Cadmium-telluride-material for thin film solar cells [J] Mater Rec 1998 13(10): 2740~2753

[2] 梁宗存,沈辉,李戡洪,太阳能电池及材料研究[J],材料导报,2000 14(8): 38~40

[3] Staebler D L, Wroski C R., et al Reversible conductivity changes in discharge produced amorphous Silicon [J]. Appl Phys Lett 1977, 31: 292

[4] 钟迪生. 硅薄膜太阳能电池研究进展 [J], 应用光学, 2001, 22(3): 34~40

[5] Sang-Kyun Kim, Jeong Chul Lee, Seong-Ju Park, Youn-Joong Kim and Kyung Hoon Yoon. Effect of hydrogen dilution on intrinsic a-Si:H layer between emitter and Si wafer in silicon heterojunction solar cell [J], Solar Energy Materials and Solar Cells 2008 92(3): 298~301

[6] X Wu, J C Kean, R G Dhere, C D Hart, D S Abin, A Duda, T A Gessert, S Asher, D H Levi, P Shelton. In Proceedings of the 17th European photovoltaic solar energy conference 2001 [C], Munich, Germany, 2001, pp 995~1001.

[7] 苏孙庆. 多晶硅薄膜太阳能电池的研究进展 [J], 技术物理教学, 2007 15(2): 45~47

[8] F Finger, Y Maj, S Klein and R Carius High efficiency

microcrystalline silicon solar cells with Hot-Wire CVD buffer layer [J], Thin Solid Films 2008, 516(5): 728~732

[9] Y Wang, X Geng, H Stiebig and F Finger Stability of microcrystalline silicon solar cells with HW CVD buffer layer [J], Thin Solid Films 2008 516(5): 733~735

[10] Alessio Bosi, Nicola Romeo, Samantha Mazzamuto and Vittorio Canevari Polycrystalline CdTe thin films for photovoltaic applications [J], Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2006 52(4): 247~279

[11] Lianhuan Feng, Lili Wu, ZhiLei Wei, Li Yaping Cai, Wei Cai, Jingquan Zhang, Qiong Luo, Bing Li and Jiagui Zheng Studies of key technologies for large area CdTe thin film solar cells [J], Thin Solid Films 2007, 515(15): 5792~5797

[12] K Ramanathan, M A Contreras and C L Perkins, et al Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe2 thin-film solar cells [J], Progress in Photovoltaics 2003 11(4): 225~230

[13] M A Contreras, K Ramanathan, J AbuShama, F Harsoon, D L Young, B Egaas and R Noufi Diode characteristics in state-of-the-art ZnO/CdS/Cu(In-xGa)xSe2 solar cells [J], Prog Photovolt 2005 13(3): 209~216

[14] Miguel A Contreras, Brian Egaas, K Ramanathan, JHiltner, A Swartzlander, F Harsoon, Rommel Noufi Progress toward 20% efficiency in Cu(In,Ga)Se2 polycrystalline thin-film solar cells [J], Prog Photovolt, 1999, 7(4): 311~316

[15] S Jost, FH eigert, R Hock, J Schulze, A Kibbs, T Völz and M Purwins The formation of CuInSe2 thin film solar cell absorbers from electroplated precursors with varying selenium content [J], Solar Energy Materials and Solar Cells 2007, 91(18): 1669~1675

[16] Donglin Xia, Janghuang Li, Man Xu and Xinjian Zhao Journal of non-crystalline solids electrodeposited and selenized CIGS thin films for solar cells [J], 2008 354(12-13): 1447~1450

[17] Liu Zhaoyun, Pan Kai, Wang Meijia, et al Influence of the mixed ratio on the photocurrent of the TiO2/SrTiO2 composite photoelectrodes sensitized by mercurochrome [J], Photochem Photobiol A: Chem, 2003, 157(1): 39~46

[18] Sahi A, Morkawa TR, Ohwaki T., et al Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides [J].

- Science, 2001, 293(13): 269~271
- [19] M Gratzel Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells[J], Inorg. Chem., 2005, 44(20): 6841~6851.
- [20] 王孔嘉, 戴松元. 染料敏化太阳电池及其进展[J], 物理, 2007, 36(11): 853~861
- [21] 孔凡太, 戴松元. 染料敏化太阳电池研究进展[J], 新材料产业, 2007(7): 32~35
- [22] 王华, 王智, 钱觉时, 唐笑, 朱小红. 纳米 TiO_2 多孔膜的微结构对染料敏化纳米晶太阳能电池性能的影响[J], 材料导报, 2007, 21(9): 48~55
- [23] 郝三存, 吴季怀, 黄昀昉, 范乐庆. 染料敏化 TiO_2 纳米晶太阳能电池研究进展[J], 材料导报, 2003, 17(7): 35~38
- [24] 陈云霞, 郝江波, 何鑫. TiO_2 基太阳能电池研究进展[J], 陶瓷学报, 2007, 28(1), 73~78
- [25] 刘显杰, 王世敏. 有机染料敏化 TiO_2 纳米晶多孔膜液体太阳能电池研究进展[J], 材料导报, 2004, 18(10): 18~24
- [26] PEDe Jongh, D Varnaekbergh Trap-limited electronic transport in nanometer-size TiO_2 particulates[J], Phys Rev Lett, 1996, 77, 3427~3430
- [27] G Shlichthorl, SY Huang, JSprague, A J Fank Band edge moment and recombination kinetics in dye-sensitized nanocrystal-line TiO_2 solar cells a study by intensity modulated photovoltage spectroscopy[J], Phys Chem. B, 1997, 101: 8141~8155
- [28] 曾隆月, 戴松元, 王孔嘉等. 染料敏化纳米 ZnO 薄膜太阳能电池机理初探[J], 物理学报, 2005, 54(1): 53~55
- [29] Kakichi K, Hosono E, Fujihara S Enhanced photoelectrochemical performance of ZnO electrodes sensitized with N-719[J], Photochem. Photobiol. A: Chem., 2006, 179(1): 81~86
- [30] Ali Ekhlil Suliman, Yiven Tang and Liang Xu Preparation of ZnO nanoparticles and nanosheets and their application to dye-sensitized solar cells[J], Solar Energy Materials and Solar Cells? 2007, 91, (18): 1658~1662
- [31] Rong Zhang, Jie Pan, Evan P Briggs Marvin Thrash and Lei L. Ker studies on the adsorption of RuN_3 dye on sheet-like nanostructured porous ZnO films[J], Solar Energy Materials and Solar Cells? 2008, 92 (4): 425~431
- [32] Yoshitake Masuda and Kazumi Kato Rapid growth of thick particulate film of crystalline ZnO in an aqueous solution[J], Thin Solid Films 2008, 516 (9): 2474~2477
- [33] D I Suh, S Y Lee, T H Kim, JM Chun, E K Suh, O B Yang and S K Lee The fabrication and characterization of dye-sensitized solar cells with a branched structure of ZnO nanowires [J], Chemical Physics Letters 2007, 442, (4-6), 17: 348~353
- [34] Poonam Suri and R. M. Mehra Effect of electrolytes on the photovoltaic performance of a hybrid dye sensitized ZnO solar cell[J], Solar Energy Materials and Solar Cells? 2007, 91, (6): 518~524
- [35] 曾隆月, 史成武, 方霞琴, 张华, 戴松元, 王孔嘉. 纳米 ZnO 在染料敏化薄膜太阳能电池中的应用[J], 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(3): 393~397
- [36] Zhigang Chen, Yiven Tang, Lisha Zhang and Lijuan Luo Electrodeposited nanoporous ZnO films exhibiting enhanced performance in dye-sensitized solar cells[J], Electrochimica Acta 2006, 51(26): 5870~5875
- [37] T Oekemann, T Yoshida, H Tada and H Minoura Color-sensitive photoconductivity of nanostructured ZnO /dye hybrid films prepared by one-step electrodeposition[J], Thin Solid Films 2006, 26(511~512): 354~357
- [38] Kazutenu Nonomura, Tsukasa Yoshida, Derck Schlettwein and Hileki Minoura One-step electrochemical synthesis of $\text{ZnO}/\text{Ru}(\text{dcbpy})_2(\text{NCS})_2$ hybrid thin films and their photoelectrochemical properties[J], Electrochimica Acta 2003, 48, (20-22): 3071~3078
- [39] 李苹, 曾隆月, 洪承浪, 钟海坚, 邝先飞. 染料敏化纳米 ZnO 薄膜太阳能电池研究进展[J], 太阳能学报, 2006, 27(7): 700~703
- [40] Djara V, Bernède J.C. Effect of the interface morphology on the fill factor of plastic solar cells [J], Thin solid films, 2005, 493: 273~277.
- [41] 王彦涛, 韦玮, 刘俊峰, 张辉. 聚合物本体异质结型太阳能电池研究进展[J], 高分子通报, 2004(6): 9~14
- [42] 黎立桂, 鲁广昊, 杨小牛, 周恩乐. 聚合物太阳能电池研究进展[J], 科学通报, 2006, 51(21): 2457~2468