

P3HT-MWCNTs 光敏性复合薄膜的制备和性能

杨正龙¹, 施旭靖¹, 刘永生², 罗智宇³

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海电力学院 数理系, 上海 200090; 3. 光大环保能源(宜兴)有限公司, 江苏 宜兴 214239)

摘要: 采用化学氧化法, 合成一种聚(3-己基噻吩), 即 P3HT, 将之与多壁碳纳米管(MWCNTs)有效复合, 最后形成一种透明的电子给体—受体异质结型 P3HT-MWCNTs 光敏性纳米复合薄膜。采用核磁共振、红外光谱、紫外-可见光谱和透射电镜等测试手段, 对合成产物进行表征和分析。研究表明, 己基的引入使得聚噻吩的溶解性能明显改善, 同时通过对碳纳米管的表面修饰和改性, 碳纳米管与 P3HT 具有较好的相容性。紫外-可见光吸收光谱显示, P3HT 薄膜比其相应的溶液具有更高的电子共轭效应, 随着氧化剂用量的提高, 有助于提高其电子共轭效应。在一定范围内, 随着 MWCNTs 含量的增加, P3HT-MWCNTs 光敏薄膜发生红移, 提高了对太阳能的利用率。

关键词: 聚噻吩; 多壁碳纳米管; 光敏性; 复合薄膜; 制备
中图分类号: O 482.7; TM 914.4 **文献标识码:** A

Preparation and Performance Study of P3HT-MWCNTs Photosensitive Hybrid Films

YANG Zhenglong¹, SHI Xujing¹, LIU Yongsheng², LUO Zhiyu³

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200090, China; 2. Department of Mathematics and Physics, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. Everbright International Limited, Yixing 214239, China)

Abstract: A new type of photosensitive hybrid films based on poly(3-hexylthiophene) (P3HT) and multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) was effectively developed, with P3HT as electron donor and the MWCNTs as electron acceptor. The resulting P3HT were characterized and investigated by ¹H NMR, FTIR, UV-Vis and TEM. The solubility of polythiophene materials was greatly improved with the introduction of hexyl group. And the MWCNTs were chemically modified to improve its compatibility with P3HT. The UV-Vis spectra show that

the conjugate effect of P3HT film is relatively higher than its solution. The conjugate effect in the P3HT film increases as its amount of oxidants increasing. The results show that the red-shift phenomenon of P3HT-MWCNTs hybrid films occurs as its MWCNTs content increases, and the solar energy usage improves with the P3HT-MWCNTs hybrid films than pure P3HT film.

Key words: polythiophene; multiwall carbon nanotubes; photosensitivity; hybrid films; preparation

随着全球能源问题和环境问题的日益严峻, 太阳能的开发和利用引起了世界各国政府的极大重视。自 1954 年第一个硅太阳能电池诞生以来, 基于光伏打效应的太阳能电池始终是人们研究的热点之一。由于有机/聚合物太阳能电池具有价格低廉、制造工艺简单、质轻、性柔, 可大面积成膜, 制备不规则器件等优点, 自 20 世纪 70 年代起逐渐引起人们的关注。1992 年, A. J. Heeger 和 K. Yoshino 等^[1-2]分别发现了从导电聚合物到富勒烯 C₆₀ 之间存在的快速光诱导电子转移(量子效率接近 100%); 1995 年, G. Yu 等^[3]通过本体异质结构型使有机/聚合物太阳能电池的能量转换效率有了突破性的进展。到目前为止, 有机/聚合物太阳能器件的能量转换效率已达 6.7%^[4], 基本上可实现在小型计算器等方面的应用。同时, 对应器件的结构也从最初的金属-聚合物-金属的“三明治”形结构^[5]、给体-受体双层异质结^[6]、本征异质结^[3], 发展到了目前的给体-受体“纳米/分子异质结”构型^[4, 7-8]。

聚(3-烷基噻吩)作为新型的共轭聚合物, 因合成方法简单、空穴迁移率高、环境和热稳定性好以及

收稿日期: 2009-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50703029, 10804072); 上海市青年科技启明星计划资助项目(09QA1406300, 07QA14026); 上海市基础研究重点资助项目(08JC1410400); 浙江大学高分子合成与功能构造教育部重点实验室开放课题资助项目(2009MSF05)

作者简介: 杨正龙(1974—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为功能高分子材料。E-mail: yangzhenglong@tongji.edu.cn

独特的化学和电化学性能,成为很有前景的电子给体和空穴传输材料.而碳纳米管作为一种性能优异的一维无机半导体材料,很有潜力用作有机太阳能电池光敏薄膜层的电子受体材料和电子传输材料.近年来,已经有人将碳纳米管(CNTs)与聚合物的复合体系用于光电转换的研究^[9-13].与C₆₀相比,CNTs同样具有优良的电子传输性,而且其特殊的一维长度能够减小电子在碳纳米管之间跳跃所造成的损失,从而增加电子的迁移率^[9,11-13].笔者以聚(3-己基噻吩)-碳纳米管复合光敏薄膜材料的制备、表征与性能研究为目的,首先从3-溴噻吩原材料出发,采用偶联反应,制备一种3-己基噻吩(3HT)单体;然后,在三氯化铁的作用下进行氧化聚合反应,得到聚(3-己基噻吩)(P3HT),并期望通过对碳纳米管的表面修饰和改性,使碳纳米管与P3HT具有较好的相容性;最后,采用核磁共振、红外光谱、紫外-可见光谱和透射电镜等测试手段,对合成产物进行表征和性能测试,并对该纳米复合薄膜的光敏性能进行研究.

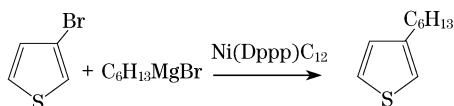
1 实验部分

1.1 仪器与试剂

1-溴己烷、镁粉、三氯化铁、三乙胺、无水乙醚、氯仿和十二胺等均为分析纯,由国药集团化学试剂有限公司提供;3-溴噻吩由聚豪精细化工有限公司提供,纯度99%;二苯基膦丙烷氯化镍由北京京泽旺化工有限公司提供,纯度99%;多壁碳纳米管由中国科学院成都有机化学有限公司提供,纯度95%.实验中用到了BRUKER公司DMX 500型核磁共振仪,BRUKER公司EQUINOX 55型红外光谱仪,HITACHI公司H-800型透射电镜,上海分析仪器厂双光束紫外-可见分光光度计等测试仪器.

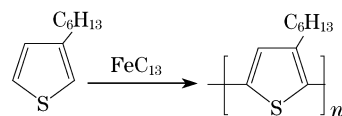
1.2 聚(3-己基噻吩)的合成

3HT的合成:按文献^[14-15],1-溴己烷(C₆H₁₃Br)与Mg反应8 h,至镁粉完全消失,得到格氏试剂C₆H₁₃MgBr;再用乙醚作为3-溴噻吩的溶剂,加入格氏试剂C₆H₁₃MgBr,在Ni(Dppp)Cl₂催化下加热反应15 h.反应方程式如下:



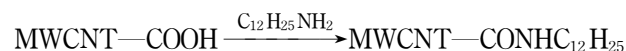
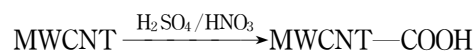
P3HT的合成:按照FeCl₃方法^[14-15],以氯仿为溶剂,在氮气保护下,室温反应3 d,最后用甲醇作为

沉淀剂,氯仿为溶剂反复沉淀和溶解,除去杂质.反应方程式如下:



1.3 碳纳米管的纯化和表面改性处理

按照文献^[11-12],碳纳米管(MWCNTs)先采用混酸氧化纯化,使其末端引入羧基活性基团,再通过引入十二胺来表面改性.



1.4 P3HT-MWCNTs 光敏复合薄膜的制备

将上述一定比例的聚(3-己基噻吩)和碳纳米管混合后,超声分散和溶解于10 mL氯仿溶剂中,制得一种P3HT-MWCNTs混合溶液;再以浇注方式成膜在钢锡金属氧化物(ITO)导电基质表面,然后自然风干.

2 结果与讨论

2.1 P3HT的合成与表征

图1是合成产物P3HT的红外光谱图.图中,3 055 cm⁻¹系噻吩环上的不饱和C—H伸缩振动;2 953,2 922,2 853 cm⁻¹属己基上的饱和C—H伸缩振动;1 507,1 456,1 376 cm⁻¹系噻吩环的特征振动吸收峰;820 cm⁻¹为噻吩环上不饱和C—H面外弯曲振动,724 cm⁻¹为烷基(侧基碳原子数n>5)的面外摇摆振动.

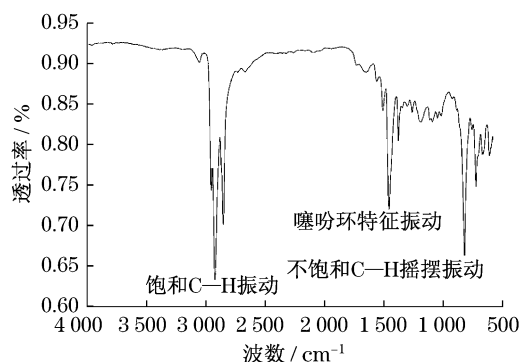


图1 P3HT的红外光谱图

Fig.1 FTIR spectrum of P3HT

图2是P3HT产物的核磁共振质子(¹H-NMR)谱图.图中,噻吩环上未被取代的氢原子(a)在化学

位移 $\delta = (6.7 \sim 7.2) \times 10^{-6}$ 产生多重峰, 在 $\delta = (2.6 \sim 2.9) \times 10^{-6}$ 为与噻吩环直接相连的烷基次甲基氢原子峰(b), 而 $\delta = (0.8 \sim 1.0) \times 10^{-6}$ 为取代基的端甲基氢原子峰(d), 聚合物其余的氢原子峰均出现在 $\delta = (1.0 \sim 2.0) \times 10^{-6}$ 处(c), 说明所合成的聚合物确实为 P3HT.

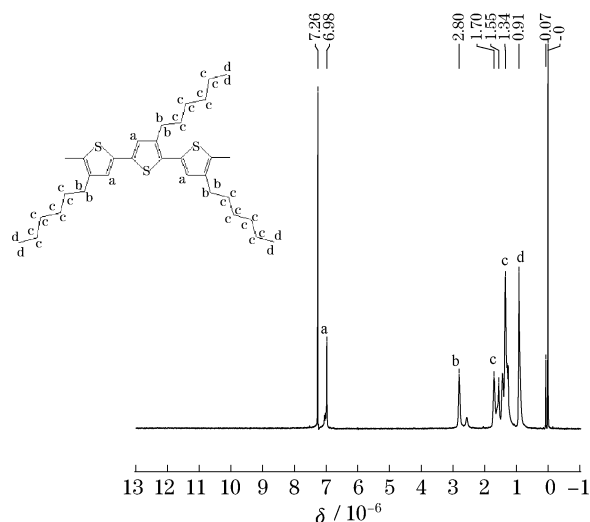


图2 P3HT的 ^1H NMR谱图

Fig.2 ^1H NMR spectrum of P3HT

从溶液态和薄膜态 P3HT 的紫外-可见光吸收谱图(图3)可见, P3HT 溶液采用氯仿为溶剂, 质量浓度约为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 与溶液态 P3HT 相比, 薄膜态的 P3HT 的紫外-可见光最大吸收峰发生红移 34 nm, 且吸收范围变宽. 说明其共轭程度的增加使得其电子跃迁所需的能量降低, 从而引起吸收峰红移. 其原因可能是溶液中由于溶剂的作用使得 P3HT 分子扭转卷曲, 而且由于其质量浓度极低, 使得分子和分子之间完全分离, 无法使电子在高分子链之间跃迁. 而以薄膜态形式存在的 P3HT, 由于堆

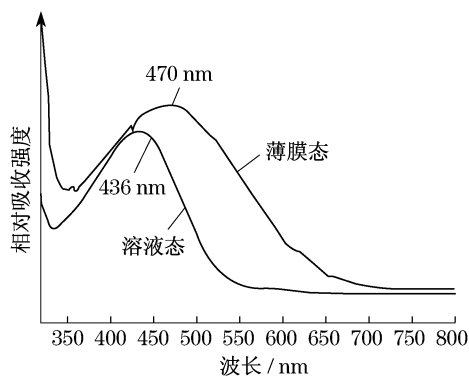


图3 P3HT 薄膜和溶液(氯仿)的紫外-可见光吸收谱图

Fig.3 UV-Vis absorption spectrum of the P3HT film and its solution (solvent: chloroform)

积紧密, 甚至部分为结晶态, 使得分子链之间能够得到很好的伸展及相互作用, 其共轭长度或共轭程度由此得到增加^[16], 导致其主链共轭吸收峰红移.

P3HT 的近程结构分为头-头、头-尾、尾-尾几种类型. 一般说来, 作为导电高分子材料的 P3HT, 最好是使用头-尾规整结构的形式, 以能得到最大的电子迁移率. 由表 1 也可以看出, 利用化学氧化法合成 P3HT 时, 随着 FeCl_3 含量的增加, P3HT 的头-尾结构比例呈上升趋势. 因此, 通过增加氧化剂 FeCl_3 的含量, 可以提高头-尾结构的比例, 亦即可以提高聚合物的导电性能, 使其成为更好的电子给体.

表1 FeCl_3 比例与 P3HT 头-尾结构比例的关系

Tab.1 Relationship between FeCl_3 content and head-to-tail structure of P3HT

| 头-尾结构比例/% | P3HT 氯仿溶液最大吸收峰/nm | $m(\text{B}) : m(\text{FeCl}_3)$ |
|-----------|-------------------|----------------------------------|
| 50 | 328 | 1 : 1 |
| 60 | 330 | 1 : 2 |
| 70 | 336 | 1 : 3 |

注: m 表示质量, B 表示单体.

为了测试 P3HT 的溶解性, 特别选用了实验室常用的几种有机溶剂测试溶解性能, 同时与相关文献^[14]所报道的聚噻吩(PT)、聚(3-十二烷基噻吩)(Pat12)的溶解性对比, 如表 2 所示.

表2 P3HT 的溶解性能

Tab.2 Solubility of P3HT

| 溶剂 | 水 | 甲醇 | 苯 | 氯仿 | 二氯甲烷 | 甲苯 | 环己烷 | 咪唑 |
|-------|---|----|---|----|------|----|-----|----|
| PT | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Pat12 | - | - | + | + | + | + | + | + |
| P3HT | - | - | + | + | + | + | +- | + |

注: + 代表易溶, - 代表不溶或者微溶, +- 代表难溶.

由表 2 测试结果可以看出, 相比 Pat12, P3HT 仅在环己烷中的溶解性稍差. 这验证了学术界所公认的一条规律, 即在 3 位取代噻吩类衍生物中, 随着碳链长度的增加, 聚合物的溶解性也相应提高. 这主要是由于烷基使得分子之间的力相对削弱, 同时烷基本身具有很好的亲油性, 从而易于溶解在极性不是很强的有机溶剂中. 环己烷几乎没有极性, 所以只能对碳链较长的烷基取代噻吩有比较好的溶解性. 另外, 根据 GPC(凝胶渗透色谱)测定的、由本实验合成的 P3HT 的分子量分布, 其数均分子量达到了 54 290, 且分布指数也达到了 1.12. 这更加说明引入己基取代的聚噻吩具有优良的溶解性能和聚合度.

2.2 MWCNTs 的化学改性

现以多壁碳纳米管溶液的分散性好坏来表征碳纳米管的化学改性效果.具体方法是,取少量改性碳纳米管溶于一定量的氯仿溶剂中,超声分散 1 h,静置 24 h 或者更长时间,观察其分散状况.根据实际观察,如果没有明显的沉降,说明碳纳米管溶液的化学改性效果较好.如图 4 所示,在静置一周后,十二胺化学改性后的碳纳米管具有良好的分散稳定性.

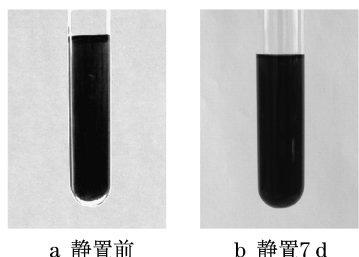


图 4 十二胺化学改性碳纳米管的氯仿溶液
Fig.4 Lauryl amine modification of MWCNTs in chloroform

2.3 P3HT-MWCNTs 光敏复合薄膜材料

2.3.1 贮存稳定性能

P3HT-MWCNTs 的氯仿混合溶液的贮存稳定性能如图 5 所示,由于碳纳米管的加入,混合溶液的颜色明显加深.这是由于碳纳米管的特殊的一维纳米结构,使其在极小的浓度下也会使溶液的表现颜色变得很深.其次,从分散性角度来说,经过数周的静置,碳纳米管并未宏观团聚,说明碳纳米管在以氯仿作溶剂的 P3HT 溶液中,分散性还是很好的.从表观判断,碳纳米管在 P3HT 的氯仿溶液中分散良好,放置数周后也未观察到任何团聚现象,表明该有机-无机纳米复合溶液具有良好的贮存稳定性和热稳定性.这为将来的成膜提供了良好的保障.

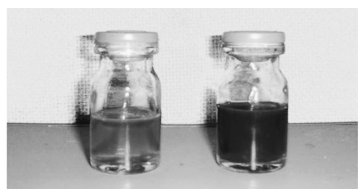


图 5 P3HT 溶液(左)与 P3HT-MWCNTs 共混溶液(右)(溶剂:氯仿)

Fig.5 Solution of P3HT (left) and P3HT-MWCNTs (right) (solvent:chloroform)

2.3.2 相容性能

如图 6 所示,与纯 MWCNTs 相比,P3HT-MWCNTs 的碳纳米管表面很粗糙,且有絮状和片状附着物,看不

到中空管状结构.说明其表面被聚合物完全覆盖.由此可以看出,P3HT 和碳纳米管之间的相容性较好.

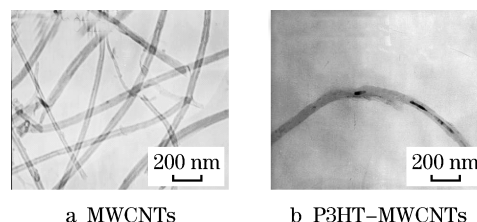


图 6 P3HT-MWCNTs 和 MWCNTs 的透射电镜图
Fig.6 TEM of P3HT-MWCNTs and MWCNTs

2.3.3 光敏性能

除了与纯 P3HT 对比,对 P3HT-MWCNTs 复合材料体系也分别做了溶液和薄膜状态下的紫外-可见光吸收光谱测试.其中,溶液和薄膜测试都使用了两种浓度配比的 P3HT-MWCNTs 复合体系,P3HT 和 MWCNTs 的质量浓度配比分别为 6:1 和 3:1.

P3HT-MWCNTs 的氯仿溶液稀释到 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其紫外-可见光吸收谱如图 7 所示.从图 7 可以看出,溶液状态下的 P3HT-MWCNTs 体系的最大吸收波长为 431 nm,与纯的 P3HT 溶液的最大吸收波长 429 nm 相当,并未明显变化.可能是由于体系浓度太低,使得聚合物和碳纳米管被均匀分散,并未产生相互作用,因此从谱图上看,就好像只有单纯的 P3HT.这一结果也证明,作为电子受体的碳纳米管在可见光区域并没有强的吸收.

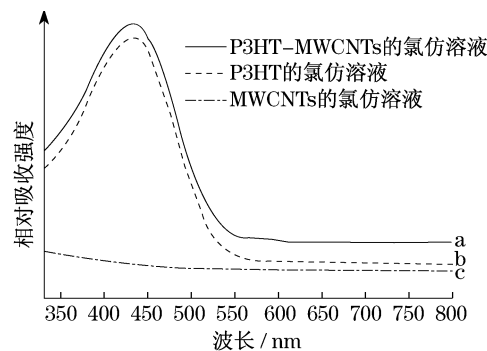


图 7 紫外-可见光吸收谱图
Fig.7 UV-Vis spectrum

薄膜态使用 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 P3HT/MWCNTs 的氯仿溶液,在比色皿器壁上涂覆,溶剂挥发后形成一层透明薄膜后直接进行紫外-可见光吸收测试,其吸收光谱图如图 8 所示.首先,由图 8 可以看出,在薄膜状态下,P3HT-MWCNTs 复合体系对可见光区域产生了强而宽的吸收,与纯 P3HT 薄膜相比,该复合体系的最大吸收波长都产生了较大的红移,而且

由于碳纳米管的引入,体系在近紫外光区域(350~400 nm)的吸光强度得到了增强.其次,当 P3HT 与 MWCNTs 的质量比为 6:1 时,复合薄膜体系的最大吸收波长为 496 nm,相对于纯的 P3HT 薄膜红移了 26 nm.当二者的质量比为 3:1 时,体系的最大吸收波长为 539 nm.相对于纯的 P3HT 薄膜红移了 69 nm.说明在一定范围内,随着碳纳米管数量的增加, P3HT-MWCNTs 复合薄膜体系的最大吸收波长的红移会相应增大,其变化的幅度与碳纳米管的含量有着非常敏感的关系,但是增大的幅度并不与碳纳米管的数量呈线性关系.

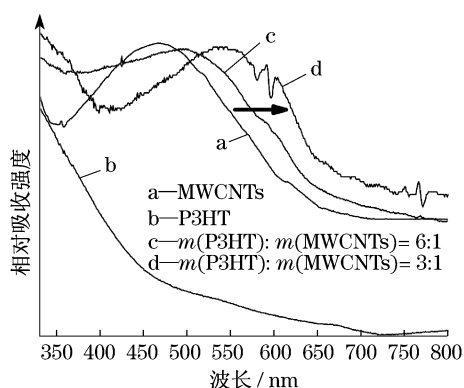


图8 不同碳纳米管含量的 P3HT-MWCNTs 薄膜的紫外-可见光吸收谱图

Fig.8 UV-Vis spectrum of P3HT-MWCNTs hybrid film with different MWCNTs contents

太阳光在照射到地面之前,经过大气层中氧气、臭氧、水蒸气、二氧化碳的吸收,剩下的光能主要分布于可见光区和近红外光区,其中,可见光区域的光能占到总能量的 70% 左右,其最大吸收波长在 500 nm 左右(如图 9 所示).上述研究结果表明,相对于纯的 P3HT,加入了碳纳米管的复合薄膜不仅拥有在

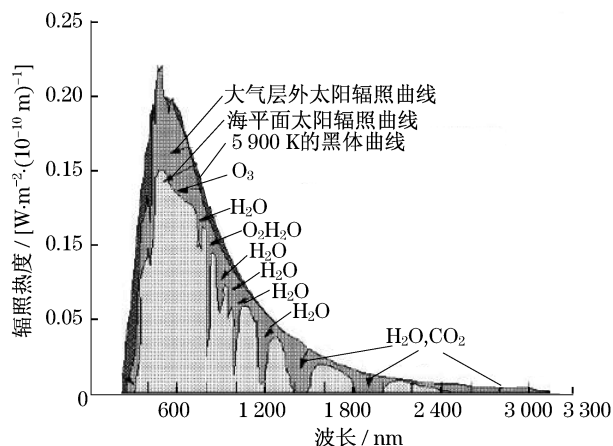


图9 太阳光谱图

Fig.9 Solar spectrum

500 nm 左右的最大吸收波长,而且在长波长方向上增强了吸收,兼顾了近红外光区的吸收,增加了太阳能的利用率.

3 结论

(1) 利用化学氧化法制备和表征了一种 P3HT, 可以通过增加氧化剂 FeCl_3 的含量,提高 P3HT 光敏性薄膜的规整性和电子共轭程度.以薄膜方式存在的 P3HT 比溶液中的 P3HT 有着更长的共轭长度或更高的共轭程度,使聚合物的吸收光谱发生红移.

(2) 通过化学修饰和表面改性处理的碳纳米管和 P3HT 的氯仿溶液具有良好的相容性,可制成 P3HT-MWCNTs 复合薄膜,这为将来进一步的器件化打下了良好的基础.

(3) 在 P3HT-MWCNTs 纳米复合体系中,在一定范围内,随着碳纳米管含量的增加,其在可见光区域内的吸收红移,与纯的 P3HT 相比,吸收光谱更加兼顾近红外光区域,与地面太阳光谱更加匹配,提高了对太阳能的利用率.

参考文献:

- [1] Sariaiftci N S, Smililowitz L, Heeger A J, et al. Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to Buckminsterfullerene[J]. Science, 1992, 258(5087):1474.
- [2] Morita S, Zakhidov A A, Yoshino K. Doping effect of Buckminstefullerene in conducting polymer: change of absorption spectrum and quenching of luminescence[J]. Solid State Commun, 1992, 82(4):249.
- [3] Yu G, Gao J, Hummelen J C, et al. Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO_2 solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies[J]. Science, 1995, 270(5243):1789.
- [4] Kim J Y, Lee K, Coates N E, et al. Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing[J]. Science, 2007, 317(5835):222.
- [5] Yu G, Zhang C, Heeger A J. Dual-function semiconducting polymer devices: light-emitting and photodetecting diodes[J]. Appl Phys Lett, 1994, 64(12):1540.
- [6] Tang C W. Two-layer organic photovoltaic cell[J]. Appl Phys Lett, 1986, 48(2):183.
- [7] Coakley K M, McGehee M D. Conjugated polymer photovoltaic [J]. Chem Mater, 2004, 16(23):4533.
- [8] Spanggaard H, Krebs F C. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics[J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2004, 83(2-3):125.
- [9] Yang Z L, Pu H T, Wan D C, et al. Phthalocyanines-MWCNT hybrid materials: fabrication, aggregation and photoconductivity properties improvement[J]. Chemical Physics Letters, 2008, 465(1-2):73.

- [10] Yang Z L, Pu H T, Yin J L. Covalent functionalization of multiwalled carbon nanotubes by polyvinylimidazole [J]. Materials Letters, 2005, 59(22): 2838.
- [11] Yang Z L, Chen H Z, Cao L, et al. Synthesis and photoconductivity study of carbon nanotube bonded by tetrasubstituted amino manganese phthalocyanine[J]. Materials Science and Engineering B, 2004, 106(1): 73.
- [12] Yang Z L, Chen H Z, Cao L, et al. Covalent functionalization of carbon nanotube by tetrasubstituted amino manganese phthalocyanine [J]. Chinese Chemical Letters, 2004, 15(6): 717.
- [13] Yang Z L, Chen H Z, Cao L, et al. Nanoscale azo pigment immobilized on carbon nanotubes via liquid phase reprecipitation approach[J]. Materials Letters, 2004, 58(17-18): 2238.
- [14] 佟拉嘎, 蹇锡高, 藤井彰彦, 等. 烷基和烷氧基取代聚噻吩的合成、表征与光电性能[J]. 高分子学报, 2004(5): 628.
Tong L G, Jian X G, Fujii A, et al. Synthesis, characterization, electro-optical properties of alkyl and alkoxy substituted poly thiophenes[J]. Acta Polymerica Sinica, 2004(5): 628.
- [15] 王红敏, 唐国强, 晋圣松, 等. 聚噻吩制备条件对其结构和导电性能的影响[J]. 化学学报, 2007, 65(21): 2454.
WANG Hongmin, TANG Guoqiang, JIN Shensong, et al. Effect of the preparation condition on the structure on the structure and conductive properties of polythiophene[J]. Acta Chimica Sinica, 2007, 65(21): 2454.
- [16] Chaudhary S, Lu H W, Muller A M, et al. Hierarchical placement and associated optoelectronic impact of carbon nanotubes in polymer-fullerene solar cells[J]. Nano Letters, 2007, 7(7): 1973.

(上接第 947 页)

- [5] Andrew W Smyth, Sami F Masri. Non-stationary response of nonlinear systems using equivalent linearization with a compact analytical form of the excitation process [J]. J Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 17: 97.
- [6] Proppe C, Pradlwarter H J, Schueller G I. Equivalent linearization and Monte Carlo simulation in stochastic dynamics [J]. J Probabilistic Engineering Mechanics, 2003, 18: 1.
- [7] Koyluoglu H U, Nielsen S R K, Cakmak A S. Solution of random structural system subject to non-stationary excitation: transforming the equation with random coefficients to one with deterministic coefficients and random initial conditions[J]. J Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1995, 14: 219.
- [8] LIU Wingkam, Ted Bel Ytschko Mani. A probabilistic finite elements for nonlinear structural dynamics[J]. J Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1986, 56: 61.
- [9] Micaletti R C, Cakmak A S, Nielsen S R K, et al. A solution method for linear and geometrically nonlinear MDOF systems with random properties subject to random excitation[J]. J Pro Engng Mech, 1998, 13(2): 85.
- [10] Yasuki Ohtori, Billie F Spencer Jr., M ASCE. Semi-implicit integration algorithm for stochastic analysis of multi-degree-of-freedom structures[J]. J Eng Mec, 2002, 128(6): 635.
- [11] Nicola Impollonia, Giuseppe Muscolino. Static and dynamic analysis of non-linear uncertain structures[J]. J Meccanica, 2002, 37: 179.
- [12] Grigoriu M. Equivalent linearization for systems driven by Levy White noise[J]. J Probabilistic Engineering Mechanics, 2000, 15: 185.
- [13] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LIN Jiahao, ZHANG Yahui. Pseudo excitation method of stochastic vibration[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [14] 范么清, 楼梦麟, 毛巍. 非线性单自由度复合随机振动的蒙特卡罗模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(1): 67.
FAN Yaoqing, LOU Menglin, MAO Wei. Monte Carlo simulation on stochastic response of SDOF double stochastic vibration system with nonlinear material [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(1): 67.
- [15] 范么清. 非线性复合随机振动方法研究及其工程应用[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.
FAN Yaoqing. Study on methods for non-linear compound stochastic vibration and their applications in Engineering[D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.