

# 低温制备介孔碳对电极构建的染料敏化太阳电池优化研究

徐顺建<sup>1</sup>, 罗玉峰<sup>1,2</sup>, 李水根<sup>1</sup>, 钟 炜<sup>1</sup>, 黄明道<sup>1</sup>

(1. 新余学院 新能源科学与工程学院, 新余 338004; 2. 南昌大学 机电学院, 南昌 330031)

**摘 要:** 以高比表面积的介孔碳为催化层材料通过低温烧结构建出对电极, 着重优化了其组装的染料敏化太阳电池(DSC)的整体结构和性能. 结果表明: 在碳浆料中添加 Triton X100 能改善碳颗粒之间以及碳催化层与衬底之间的接触界面, 促使 DSC 的转换效率从 4.50% 提升到 4.82%, 增幅为 7.1%. 随 TiO<sub>2</sub> 薄膜厚度增加, DSC 的转换效率先急剧增加, 随后趋于缓和, 其变化趋势是染料吸附量与电子传输路径相互竞争的结果. 在电解质中添加磷酸三丁酯能减小电解质电阻, 促使 DSC 的转换效率从 3.59% 提升到 4.42%, 增幅为 23.1%. 优化后, 介孔碳对电极 DSC 的转换效率达到 4.82%.

**关 键 词:** 介孔碳; 对电极; 低温制备; 太阳电池  
**中图分类号:** TM914 **文献标识码:** A

## Optimization of Dye-sensitized Solar Cells Consisting of Low-temperature Fabricated Mesoporous Carbon Counter Electrode

XU Shun-Jian<sup>1</sup>, LUO Yu-Feng<sup>1,2</sup>, LI Shui-Gen<sup>1</sup>, ZHONG Wei<sup>1</sup>, HUANG Ming-Dao<sup>1</sup>

(1. School of New Energy Science and Engineering, Xinyu University, Xinyu 338004, China; 2. School of Mechatronics Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Carbon counter electrode was fabricated using high surface area mesoporous carbon (MC) as catalytic material at low temperature. The integral structure and the photovoltaic performances of dye-sensitized solar cells (DSC) consisting of the obtained carbon counter electrode were emphatically optimized. The results show that both contact interface among MC particles and that between carbon catalytic film and substrate are improved by adding Triton X100 into MC slurry, leading to an increase of 7.1% in the efficiency of DSC. With the increasing thickness of TiO<sub>2</sub> film, the efficiency of DSC sharply increases at first and tends to stabilization later on. The change in the efficiency is the result of competition between the adsorption amount of dye and the transmission path of electron in the TiO<sub>2</sub> film. The resistance of electrolyte is reduced by mixing tributyl phosphate into electrolyte, resulting in an increase of 23.1% in the efficiency of DSC. The optimum efficiency of DSC employing carbon counter electrode reaches 4.82%.

**Key words:** mesoporous carbon; counter electrode; low-temperature preparation; solar cells

染料敏化太阳电池(dye-sensitized solar cells, DSC)是一类新型薄膜太阳电池, 具有较高的转换效率(稳定在 10%), 并且成本较低(约为晶体硅太阳电池的 1/5~1/10)、工艺简单、器件可柔性化等<sup>[1-3]</sup>. 2009 年英国 G24i 公司在全球率先推出小功率 DSC 产品,

DSC 由光电极、敏化剂、电解质及对电极四部分组成, 其中对电极由导电衬底和 Pt 催化层组成, 起收集外电路电子及还原氧化态电解质的作用<sup>[4-5]</sup>. Pt 的相对用量虽然较少(约 50 mg/m<sup>2</sup>), 但是将来发展到兆瓦级别时, 其总量将大幅度增加, 这不仅不利于

收稿日期: 2011-04-19; 收到修改稿日期: 2011-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51162025); 江西省自然科学基金 (2010GQC0178); 江西省教育厅资助科研项目(GJJ11639); 新余学院资助科研项目(Xj0902)

National Natural Science Foundation of China (51162025); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (2010GQC0178); Educational Commission of Jiangxi Province (GJJ11639); Xinyu University, China (Xj0902)

作者简介: 徐顺建(1978-), 男, 博士, 讲师. E-mail: sjxu@yahoo.cn

DSC 产业化, 而且与其低成本的初衷相违背<sup>[6-7]</sup>. 此外, Pt 催化层因长期浸泡在电解质中易被腐蚀, 导致器件稳定性下降. 因此, 非 Pt 催化层的研制是 DSC 大规模产业化面临的关键问题.

在众多非 Pt 催化层材料中, 低成本、高催化活性且来源广泛的碳材料极具应用潜力. 作为催化层使用的碳材料包括石墨、活性炭、炭黑、富勒烯、碳纳米管、石墨烯以及多孔碳等<sup>[8-15]</sup>. 不同于石墨、碳纳米管等碳材料, 低结晶度的多孔碳不仅具有更高的活性表面积和更多的晶体边缘, 能提供更多的起催化还原电解质作用的活性点, 而且其发达的孔隙结构为  $0.3\sim 0.6$  nm 大小的  $I_3^-$  扩散提供了更有效的通道, 相应 DSC 具有更佳的转换效率<sup>[14-15]</sup>. 在制备碳对电极时, 为了使粉末状碳材料连接成膜, 需加入一定量的有机粘结剂(如羧甲基纤维素)或者无机粘结剂(如  $TiO_2$  溶胶). 就性能而言, 无机粘结剂具有一定的优势, 但是对电极涂膜后所需的高温烧结(通常为  $400^\circ\text{C}$ )妨碍了碳材料作为柔性对电极(以有机导电薄膜为衬底)催化层材料的应用, 无法实现器件柔性化.

本工作以低结晶度、高比表面积的介孔碳为催化层材料, 通过低温制备( $120^\circ\text{C}$ )构建出介观尺寸孔隙结构的碳对电极, 着重对其组装的 DSC 的整体结构和性能进行优化, 具体研究碳浆料添加剂、光电极  $TiO_2$  薄膜厚度、电解质添加剂以及两电极间距对 DSC 光电性能的影响.

## 1 实验

### 1.1 碳对电极制备

构建碳对电极的介孔碳由热固性酚醛树脂和乙二醇混和物通过聚合诱导相分离热解技术制得, 详细工艺参见前期研究<sup>[16-17]</sup>. 将制得的介孔碳通过研磨、过筛以获得介孔碳颗粒. 介孔碳的平均孔径、气孔率和比表面积分别为  $39.9$  nm、 $45.06\%$  和  $614.1$   $\text{m}^2/\text{g}$ .

首先将  $0.6$  g 介孔碳颗粒、 $0.06$  g 羧甲基纤维素和  $8$  mL 乙醇水溶液通过研磨混合; 随后, 采用刮刀技术将获得的碳浆料涂覆在 FTO 导电玻璃上, 形成大小约为  $0.6\text{ cm}\times 0.6\text{ cm}$  的碳膜; 然后经  $120^\circ\text{C}$  保温  $2$  h 制备出碳对电极.

### 1.2 器件组装

光电极制备工艺: 通过研磨混合  $4$  g 普通市售纳米  $TiO_2$  粉末(锐钛矿晶型)、 $1.6$  g PEG-20000、 $0.2$  mL 乙酰丙酮、 $15$  mL 二次水和  $1$  mL  $10\text{ vol}\%$  Triton X100 水溶液; 将获得的浆料涂覆在 FTO 导电

玻璃上, 形成大小约为  $0.6\text{ cm}\times 0.6\text{ cm}$  的  $TiO_2$  薄膜, 薄膜的厚度用胶带控制. 将完成涂层后的试样置入电阻炉中, 在空气中升至  $450^\circ\text{C}$  并保温  $30$  min; 随后对试样进行  $40\text{ mmol/L}$   $TiCl_4$  水溶液处理及  $450^\circ\text{C}$  二次烧结, 冷却至  $80^\circ\text{C}$  立即浸入  $0.5\text{ mmol/L}$  N719 染料的乙醇溶液中, 避光保持  $24$  h 进行敏化处理.

将碳对电极和光电极叠成三明治结构, 中间插入垫片, 构成 DSC. 然后缓慢地注入电解质, 电解质因毛细作用力自发进入两电极之间. 电解质为  $0.5\text{ mol/L}$  KI、 $0.05\text{ mol/L}$   $I_2$  以及  $0.5\text{ mol/L}$  磷酸三丁酯的乙腈和 EG 溶液.

### 1.3 表征与测试

用德国蔡司 EVO MA10 型扫描电镜(SEM)观察碳膜和  $TiO_2$  薄膜的形貌.  $TiO_2$  薄膜的厚度依据相应断口形貌图测量得到, 其值采用  $5$  处以上不同部位厚度的平均值. 电化学阻抗谱(EIS)测试采用两个相同碳对电极构成的、对称结构的电化学电池. 阻抗测试在暗场下进行, 频率范围为  $0.01\text{ Hz}\sim 100\text{ kHz}$ , 交流幅值为  $10\text{ mV}$ . DSC 光电性能测试以 CHF-XM500 型平行光氙灯光源为模拟光源, 光强度由标准硅电池校正为  $100\text{ mW}/\text{cm}^2$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳浆料中的添加剂对 DSC 光电性能的影响

图 1 为对电极上碳催化层的形貌, 碳颗粒具有不规则的几何形状且表面凹凸不平, 其粒径在  $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$  之间. 这种宏观结构的碳颗粒能够为还原  $I_3^-$  提供更多的催化活性点. 进一步的观察表明, 碳颗粒中的介孔依然保持, 这些孔为  $I_3^-$  进入介孔碳内部进而参与还原提供有效的通道.

Triton X 100 是制备光电极  $TiO_2$  薄膜时选用的表面活性剂. 通过添加 Triton X100, 不仅能有效地阻止纳米尺寸  $TiO_2$  颗粒团聚, 而且能改善  $TiO_2$  薄膜与衬底之间的接触, 进而提高 DSC 的转换效率<sup>[18]</sup>. 为了实现碳对电极的改性, 将 Triton X100 引入碳对电极制备中. 表 1 列出了在碳浆料中添加 Triton X100 前后 DSC 的光电性能. 在碳浆料中添加 Triton X100 提高了 DSC 的转换效率, 其值从  $4.50\%$  增加到  $4.82\%$ , 增幅为  $7.1\%$ . 鉴于 Triton X100 在  $TiO_2$  薄膜制备中的作用机制以及玻璃质介孔碳颗粒不易团聚的特性, 在碳浆料中添加 Triton X100 引起的 DSC 转换效率增加可归功于碳颗粒之间以及碳催化层与衬底之间接触界面的改善.

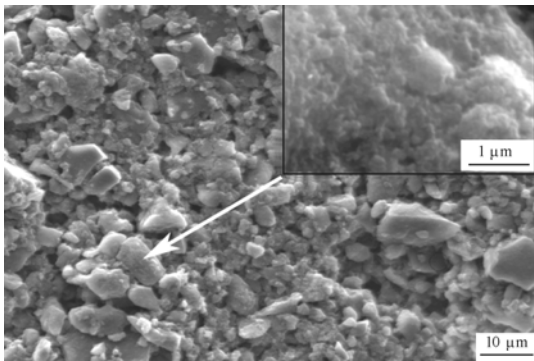


图 1 对电极碳催化层形貌  
Fig. 1 SEM images of catalytic layer derived from mesoporous carbon

表 1 Triton X100 对 DSC 光电性能的影响  
Table 1 Effect of Triton X100 in carbon paste on the photovoltaic parameters of DSC

Triton X100	$V_{oc}$ /V	$J_{sc}$ /(mA·cm <sup>-2</sup> )	$FF$	$\eta$ /%
No-mixing	0.687	12.66	0.517	4.50
Mixing	0.695	13.95	0.497	4.82

$V_{oc}$ : Open circuit voltage;  $J_{sc}$ : Short circuit photocurrent density;  $FF$ : Fill factor;  $\eta$ : Conversion efficiency

2.2 TiO<sub>2</sub> 薄膜厚度对 DSC 光电性能的影响

光电极上的 TiO<sub>2</sub> 薄膜呈多孔结构, 是决定 DSC 光电性能的关键部分, 不仅起着承载染料分子的功

能, 而且本身参与激子分离和电子导出. TiO<sub>2</sub> 薄膜能通过本身的厚度、表面形貌以及 TiO<sub>2</sub> 颗粒尺寸、形貌、晶体结构等参数影响 DSC 的光电性能. 在以上影响因素中, TiO<sub>2</sub> 薄膜厚度非常关键<sup>[19-20]</sup>. TiO<sub>2</sub> 薄膜厚度对碳对电极 DSC 光电性能的影响如图 2 所示. 由图 2(a)可知, 当薄膜厚度从 4.28 μm 增加到 7.76 μm 时, DSC 的转换效率急剧增加, 其值从 2.24%增加到 4.08%, 增幅达到 82.1%; 进一步增加薄膜厚度时, 转换效率的变化趋于平稳; 当薄膜厚度为 20.03 μm 时, 转换效率达到最大值(4.76%). 对照 DSC 的短路电流、开路电压及填充因子随薄膜厚度的变化趋势可知, 转换效率的提升归功于短路电流的增加. 短路电流随薄膜厚度的变化趋势与转换效率极其相似, 即随薄膜厚度增加, 先急剧增加, 随后趋于缓和, 如图 2(b)所示. 不同于短路电流, 开路电压和填充因子均随薄膜厚度增加总体上趋于减小, 如图 2(c)和(d)所示.

当 TiO<sub>2</sub> 薄膜较薄时, 由于吸附在薄膜表面的染料分子数量较少, 不足于充分吸收入射光, 产生的光生电流较小, 导致转换效率较低. 当薄膜厚度增加后, 增加的染料分子加强了光生电流, 最终提升了 DSC 的转换效率. 薄膜厚度的增加同时也使电子在薄膜中的传输路径变长, 导致电子与电解质溶液中 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 的复合增多, 抵消了部分染料分子加强的光生

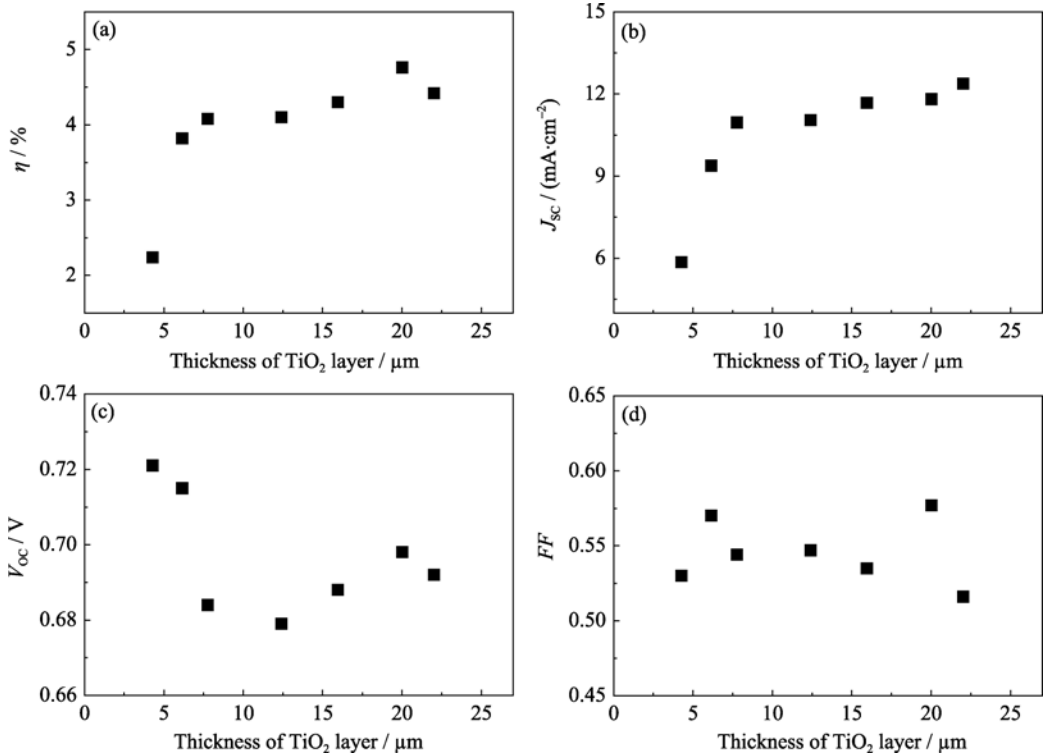


图 2 TiO<sub>2</sub> 薄膜厚度对 DSC 光电性能的影响  
Fig. 2 Effect of the thickness of TiO<sub>2</sub> layer on the photovoltaic parameters of DSC  
(a) Conversion efficiency; (b) Short circuit photocurrent density; (c) Open circuit voltage; (d) Fill factor

电流. 因此, 当薄膜具有一定厚度后, 转换效率变化趋于缓和. 可见,  $\text{TiO}_2$  薄膜厚度对转换效率的影响是染料吸附量与电子传输路径相互竞争的结果.

$\text{TiO}_2$  薄膜表面形貌如图 3 所示, 由图可知, 薄膜中的孔分布比较均匀且孔隙结构十分发达, 孔的尺寸小于  $1\text{ }\mu\text{m}$ . 进一步的观察表明,  $\text{TiO}_2$  骨架表面凹凸不平, 有利于吸附更多的染料分子. 同时也发现  $\text{TiO}_2$  颗粒本身的尺寸约  $100\text{ nm}$ , 且颗粒稍有团聚, 在一定程度上减少了所吸附染料分子的数量. 如果用颗粒尺寸更小、型号为 Degussa P25 的  $\text{TiO}_2$  颗粒取代本研究采用的普通市售  $\text{TiO}_2$  颗粒, 预计 DSC 的转换效率将进一步提高<sup>[21]</sup>.

2.3 电解质中的添加剂对 DSC 光电性能的影响

在目前用于液态电解质的氧化还原对供体对中,  $\text{KI}/\text{I}_2$  供体对具有较低的成本, 但存在电池效率偏低的问题. 在电解质中添加能减小氧化还原扩散系数以及减低电解质电阻的添加剂, 是进一步改善其电池效率的有效途径. 常用的添加剂有氮杂环化合物和硫氰酸胍<sup>[22]</sup>. 磷酸三丁酯常作为氯化橡胶的增塑剂使用, 能削弱分子之间的范德华力, 增加分子的移动性. 为了实现  $\text{KI}/\text{I}_2$  供体对电解质改性, 将磷酸三丁酯引入电解质. 表 2 列出了在电解质中添加磷酸三丁酯前后的碳对电极 DSC 的光电性能. 磷酸三丁酯的添加提高了 DSC 的短路电流和开路电压, 转换效率从  $3.59\%$  增加到  $4.42\%$ , 增幅为  $23.1\%$ .

为了分析转换效率改善的原因, 评估了相应电

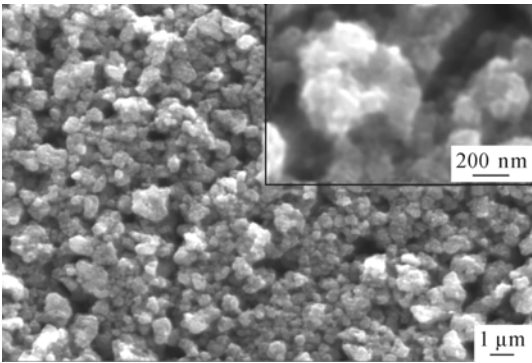


图 3 光电极  $\text{TiO}_2$  薄膜的 SEM 照片  
Fig. 3 SEM image of  $\text{TiO}_2$  layer

表 2 磷酸三丁酯对 DSC 光电性能的影响

Table 2 Effect of tributyl phosphate (TBP) in electrolyte on the photovoltaic parameters of DSC				
TBP	$V_{\text{OC}}/\text{V}$	$J_{\text{SC}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	FF	$\eta/\%$
Mixing	0.692	12.37	0.516	4.42
Unmixing	0.670	10.36	0.517	3.59

$V_{\text{OC}}$ : Open circuit voltage;  $J_{\text{SC}}$ : Short circuit photocurrent density; FF: Fill factor;  $\eta$ : Conversion efficiency

化学电池的阻抗参数, 如表 3 所示, 其值由图 4 所示的电化学阻抗谱和等效电路采用 Z-view 软件拟合得到. 在三个阻抗参数中<sup>[15]</sup>, 电荷转移阻抗( $R_{\text{ct}}$ )代表碳对电极还原  $\text{I}_3^-$  的电催化活性; 欧姆串阻( $R_s$ )由电化学电池中两个相同碳对电极的方块电阻及电解质电阻组成; Nernst 扩散阻抗( $Z_w$ )与电解质中氧化还原对在碳对电极上的扩散能力相关. 由表 3 可知, 磷酸三丁酯减弱了碳对电极的电催化活性,  $R_{\text{ct}}$  值从  $7.02\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$  增加到  $10.76\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 几乎不影响氧化还原对在碳对电极上的扩散能力,  $Z_w$  值依然维持在  $23\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$  左右. 唯一得到改善的是欧姆串阻, 其值从  $44.60\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$  减小到  $31.39\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ . 由此可知, 在电解质中添加磷酸三丁酯主要是通过减小电解质电阻实现 DSC 转换效率的改善.

2.4 两电极间距对 DSC 光电性能的影响

两电极间距即为 DSC 的光电极和碳对电极之间的间隔, 由插在两电极之间的隔膜厚度控制, 此空间填充电解质. 图 5 为碳对电极 DSC 光电性能随两电极间距的变化规律, 同时列出了两电极直接接触的简易 DSC(未封装)的光电性能. 由图 5(a)可知, DSC 的转换效率先随两电极间距增加而增大, 当间距为  $50\text{ }\mu\text{m}$  时达到最大值( $4.22\%$ ), 随后下降到间距为  $180\text{ }\mu\text{m}$  时  $3.26\%$ . 结合图 5(b)和(c)可知, 增加的转换效率归功于短路电流和开路电压的改善, 特别是短路电流. 短路电流由间距为  $180\text{ }\mu\text{m}$  时的

表 3 磷酸三丁酯对阻抗参数的影响

Table 3 Effect of tributyl phosphate (TBP) in electrolyte on the impedance parameters of electrochemical cell

TBP	$R_{\text{ct}}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$Z_w/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
Mixing	10.76	31.39	23.70
Unmixing	7.02	44.60	23.21

$R_{\text{ct}}$ : Charge transfer resistance;  $R_s$ : Ohmic serial resistance;  $Z_w$ : Nernst diffusion impedance

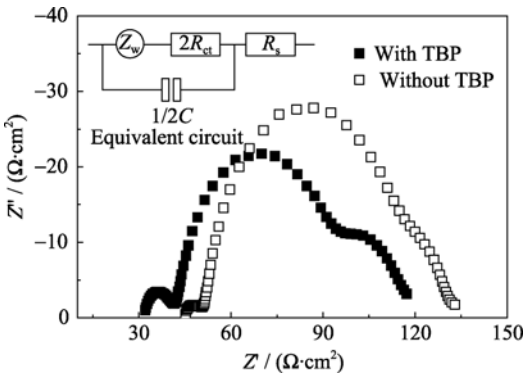


图 4 磷酸三丁酯对 EIS 的影响  
Fig. 4 Effect of tributyl phosphate (TBP) in electrolyte on the EIS of electrochemical cell

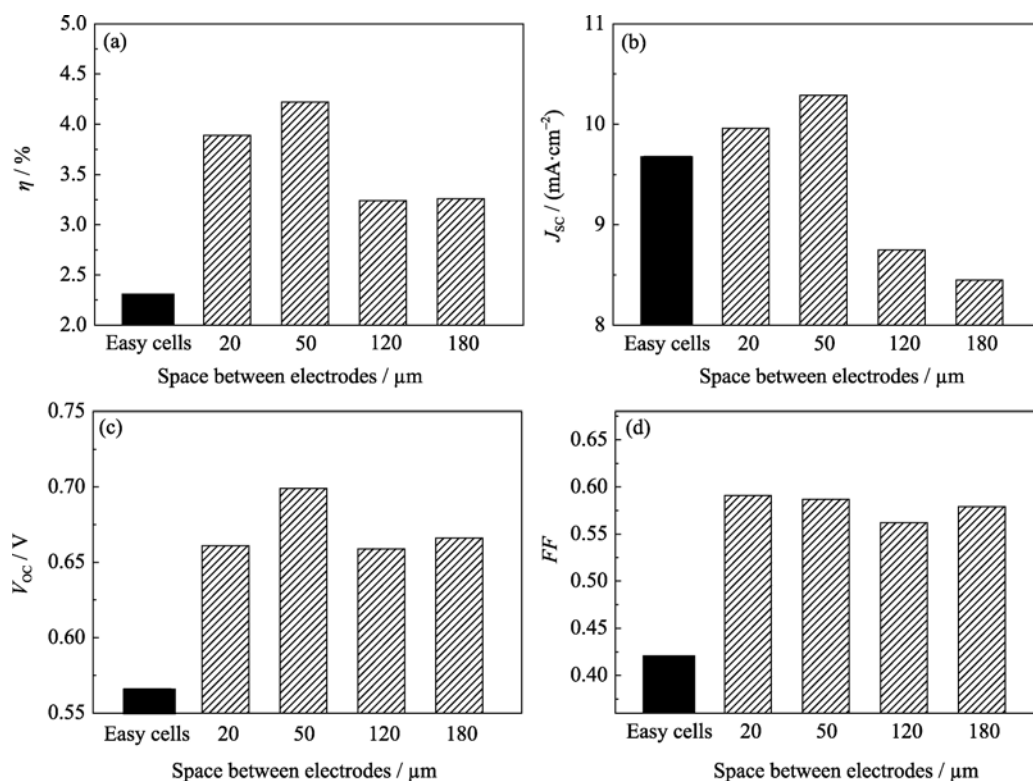


图 5 两电极间距对 DSC 光电性能的影响

Fig. 5 Effects of space between electrodes on the photovoltaic parameters of DSC

(a) Conversion efficiency; (b) Short circuit photocurrent density; (c) Open circuit voltage; (d) Fill factor

8.45  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 增加到间距为 50  $\mu\text{m}$  时的 10.29  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , 增幅为 21.8%, 而开路电压由 0.661 V 增加到 0.699 V, 增幅为 5.7%。相对而言, 填充因子仅在 0.562~0.591 之间波动, 如图 5(d)所示。此外, 简易 DSC 的转换效率比封装后 DSC 的转换效率均要低, 其值仅为 2.3%, 主要由过低的填充因子和开路电压造成。

两电极间距代表了氧化还原对在光电极与对电极之间的扩散路径长度<sup>[23]</sup>。过大的间距延长了氧化还原对的扩散路径, 无法使处于氧化态的氧化还原对被及时地还原, 进而减慢了激发态染料分子的再生速率, 导致导带电子被激发态染料分子捕获, 促使转换效率降低。过小的间距虽然缩短了氧化还原对的扩散路径, 但是会引起 DSC 内部出现暗电流及复合电流, 结果使转换效率大幅度下降。

### 3 结论

以介孔碳为催化层材料, 通过低温烧结制备出对电极, 着重对其组装的 DSC 的整体结构和性能进行优化:

1)在碳浆料中添加 Triton X100 能改善碳颗粒之间以及碳催化层与衬底之间的接触界面, 进而通过短路电流的改善使转换效率提升了 7.1%;

2)DSC 的转换效率和短路电流均随  $\text{TiO}_2$  薄膜厚度增加先急剧增大, 随后趋于缓和, 其影响是染料吸附量与电子传输路径相互协调的结果;

3)在电解质中添加磷酸三丁酯能减小电解质电阻, 促使 DSC 的转换效率提升了 23.1%;

4)当两电极间距为 50  $\mu\text{m}$  时, DSC 的转换效率达到最大值。优化后, 介孔碳对电极 DSC 的转换效率达到 4.82%。

### 参考文献:

- [1] O'Regan B, Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal  $\text{TiO}_2$  films. *Nature*, 1991, **353**(24): 737-739.
- [2] ZHANG Ji-Yuan, TIAN Han-Min, TIAN Zhi-Peng, *et al.* Study on sol-hydrothermal synthesis of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles and their photoelectric properties sensitized by dye. *Journal of Inorganic Materials*, 2009, **24**(6): 1110-1114.
- [3] LAN Zhang, WU Ji-Huai, LIN Jian-Ming, *et al.* Synthesis of rutile  $\text{TiO}_2$  nanorod and application in dye-sensitized solar cell. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, **26**(2): 119-122.
- [4] Ramasamy E, Lee W J, Lee D Y, *et al.* Spray coated multi-wall carbon nanotube counter electrode for tri-iodide reduction in

- dye-sensitized solar cells. *Electrochem. Commun.*, 2008, **10**(7): 1087–1089.
- [5] Murakami T N, Grätzel M. Counter electrodes for DSC: application of functional materials as catalysts. *Inorg. Chim. Acta*, 2008, **361**(3): 572–580.
- [6] Murakami T N, Ito S, Wang Q, *et al.* Highly efficient dye-sensitized solar cells based on carbon black counter electrodes. *J. Electrochem. Soc.*, 2006, **153**(12): A2255–A2261.
- [7] Koo B K, Lee D Y, Kim H J, *et al.* Seasoning effect of dye-sensitized solar cells with different counter electrodes. *J. Electroceram.*, 2006, **17**(1): 79–82.
- [8] Kay A, Grätzel M. Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder. *Sol. Energy Mater. Sol. C*, 1996, **44**(1): 99–117.
- [9] Imoto K, Takahashi K, Yamaguchi T, *et al.* High-performance carbon counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. C*, 2003, **79**(4): 459–469.
- [10] Hino T, Ogawa Y, Kuramoto N. Preparation of functionalized and non-functionalized fullerene thin films on ITO glasses and the application to a counter electrode in a dye-sensitized solar cell. *Carbon*, 2006, **44**(5): 880–887.
- [11] Hwang S, Moon J, Lee S, *et al.* Carbon nanotubes as counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(25): 1455–1456.
- [12] Choi H, Kim H, Hwang S, *et al.* Dye-sensitized solar cells using graphene-based carbon nano composite as counter electrode. *Sol. Energy Mater. Sol. C*, 2011, **95**(1): 323–325.
- [13] Ramasamy E, Lee W J, Lee D Y, *et al.* Nanocarbon counter electrode for dye sensitized solar cells. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(17): 173103–1.
- [14] Huang Z, Liu X, Li K, *et al.* Application of carbon materials as counter electrodes of dye-sensitized solar cells. *Electrochem. Commun.*, 2007, **9**(4): 596–598.
- [15] Fan S Q, Fang B, Kim J H, *et al.* Ordered multimodal porous carbon as highly efficient counter electrodes in dye-sensitized and quantum-dot solar cells. *Langmuir*, 2010, **26**(16): 13644–13649.
- [16] XU Shun-Jian, QIAO Guan-Jun, WANG Hong-Jie, *et al.* Preparation of mesoporous carbon by phenol resin polymerization-dependent phase separation and pyrolysis. *Journal of Inorganic Materials*, 2008, **23**(5): 971–974.
- [17] Xu S J, Li J, Qiao G J, *et al.* Pore structure control of mesoporous carbon monoliths derived from mixtures of phenolic resin and ethylene glycol. *Carbon*, 2009, **47**(8): 2103–2111.
- [18] 张 苑, 蔡 宁, 赵 颖, 等. Triton X-100 对染料敏化太阳能电池性能影响的研究. 影像科学与光化学, 2008, **26**(2): 125–130.
- [19] 范乐庆, 吴季怀, 黄昀昉, 等. 染料敏化太阳能电池中电子传输性能. 太阳能学报, 2005, **26**(1): 34–38.
- [20] 方霞琴, 戴松元, 王孔嘉, 等. 小面积染料敏化纳米薄膜太阳能电池的优化研究. 太阳能学报, 2006, **27**(10): 973–978.
- [21] 胡林华, 戴松元, 王孔嘉(HU Lin-Hua, *et al.*). 纳米 TiO<sub>2</sub> 多孔膜的微结构对染料敏化纳米薄膜太阳能电池性能的影响. 物理学报 (Acta Phys-Chim Sinica), 2005, **54**(4): 1914–1918.
- [22] 史成武, 葛 茜, 李 兵, 等(SHI Cheng-Wu, *et al.*). 添加剂对染料敏化太阳能电池电解质性能的影响. 物理化学学报(Acta Phys-Chim Sinica), 2008, **24**(12): 2327–2330.
- [23] Grätzel M. Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells. *J. Photoch. Photobio. A*, 2004, **164**(1/2/3): 3–14.