

# 染料敏化纳米薄膜太阳能电池实验研究<sup>\*</sup>

戴松元<sup>†</sup> 孔凡太 胡林华 史成武 方霞琴 潘 旭 王孔嘉

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2004 年 4 月 21 日收到, 2004 年 11 月 5 日收到修改稿)

染料敏化纳米薄膜太阳能电池(DSCs)的性能主要是由纳米多孔 TiO<sub>2</sub> 薄膜、染料光敏化剂、电解质、反电极(光阴极)等几个主要部分决定的. 通过优化 DSCs 各项关键技术和材料的性能, 并通过小面积 DSCs 的系列实验和优化组合实验来检测各项参数对 DSCs 性能的影响, 获得在光照 1 个太阳(AM1.5)下, 光电转换效率达到 8.95%. 这为进行产业化制备大面积 DSCs 打下了良好基础.

关键词: 染料敏化, 太阳能电池, 优化, 效率

PACC: 8630J, 7360F, 8100, 8610K

## 1. 引 言

染料敏化纳米薄膜太阳能电池(DSCs)研究的成功是人类利用太阳能的一个重要进展, 其原理与自然界中光合作用的原理十分相近. 随着半导体光电化学的发展和纳米技术的进步, DSCs 的研究在 20 世纪 90 年代初取得了突破, 1991 年 Grätzel 研究小组<sup>[1]</sup>把平板电极改换成纳米多孔电极以后, 电池的光电转换效率达到 7.1%, 为 DSCs 的研究开辟了新天地, 使人们看到其在实际应用中的前景. 特别是为未来工业化生产提供了新思路. 目前实验室电池的最高光电转换效率已达到 11.04%<sup>[2]</sup>. 与此同时, 工业化生产可行性研究也在同时进行, 并取得了较好的成绩. 瑞士洛桑高等工业学院(EPFL)在小面积(面积小于 1 cm<sup>2</sup>)电池上取得最好的成绩, 荷兰国家能源研究所(ECN)在条状电池(2.5 cm<sup>2</sup>)上取得的最高光电转换效率达到 8.2%<sup>[3]</sup>. 大面积电池的研制和产业化一直是这种电池发展和研究的难点, 澳大利亚可持续发展能源公司(STA)在 2002 年 10 月建成了 200 m<sup>2</sup> DSCs 演示屋顶, 集中体现了未来工业化的前景<sup>[4]</sup>. 日本、瑞士和美国等一些公司也相继加入产业化研究的行列. 我国的 DSCs 产业化研究方面, 在中国科学院和国家科学技术部的领导和资助下, 经过近两年努力, 研究水平已与世界相近. 在大面积

DSCs 上取得了突破, 制备出 15 cm × 20 cm 电池组件, 并组装成 1.8 m × 0.8 m 的电池板, 为下一步工业化生产打下了良好的基础.

## 2. DSCs 的优化实验研究

DSCs 主要由纳米多孔 TiO<sub>2</sub> 薄膜、染料光敏化剂、电解质、反电极(光阴极)和透明电极几部分组成<sup>[5-7]</sup>, 各部分的优化组合对 DSCs 性能的影响较大. 本文通过对各部分的优化组合实验研究, 以获得较高性能的 DSCs.

### 2.1. 纳米多孔 TiO<sub>2</sub> 薄膜的优化组合

目前用于 DSCs 中的纳米多孔 TiO<sub>2</sub> 薄膜基本上采用溶胶-凝胶的方法制备, 其中在制备过程中的许多参数, 如热处理温度、热处理时间和溶液的前驱体状况等都会对 DSCs 性能带来较大的影响, 有的文献<sup>[8-11]</sup>对此已作过报道. 也有采用别的氧化物半导体薄膜和利用其他氧化物半导体掺杂的 TiO<sub>2</sub> 半导体薄膜作为染料敏化光阴极, 或利用表面包覆等技术来改善光阴极的表面性能<sup>[12-15]</sup>. 总之, 通过 TiO<sub>2</sub> 薄膜的优化可以达到提高电池性能的目的. 本文则主要对其中部分参数作一些优化研究.

#### 2.1.1. 纳米 TiO<sub>2</sub> 微结构的优化

通过对纳米 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜中一些影响微结构

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划 批准号: G2000028206 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: sydai@ipp.ac.cn

的参数,如纳米颗粒的形貌、大小和孔隙率等的优化来提高薄膜的性能.通过对制备纳米  $\text{TiO}_2$  多孔薄膜的前驱体的参数控制,达到控制多孔薄膜中微结构的变化.图 1 为不同 pH 条件下获得的纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒形貌像.从图 1 可以看出, $\text{TiO}_2$  颗粒形貌差别较大.酸性条件下形成的  $\text{TiO}_2$  颗粒呈正方体,而碱性条件下形成的  $\text{TiO}_2$  颗粒呈长柱形.这会使电池的性能产生比较明显的差异.表 1 给出的是利用图 1 中两种  $\text{TiO}_2$  制备的薄膜组装电池的主要性能参数,如

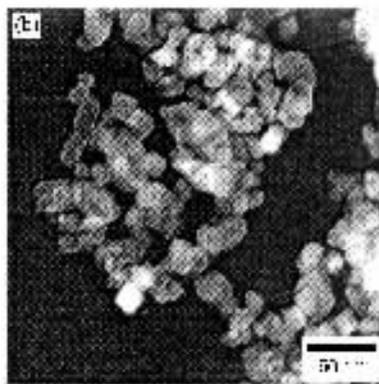
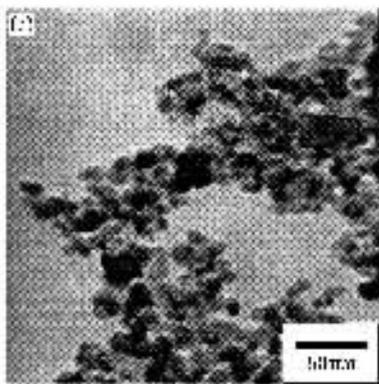


图 1 不同 pH 条件下获得的纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒形貌像 (a) pH = 1.0, (b) pH = 12

开路电压  $V_{oc}$ 、短路电流密度  $J_{sc}$ 、填充因子  $F$  和光电转换效率  $\eta$ .由表 1 可以看出,就  $\text{TiO}_2$  多孔薄膜的整体性能而言, $\text{TiO}_2$  前驱体在碱性条件下制备要比在酸性条件下制备略好一些,其中电流密度的差别比较明显.

表 1  $\text{TiO}_2$  前驱体 pH 值对 DSCs 性能的影响

pH	$V_{oc}/V$	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$F$	$\eta/\%$
1.0	$0.70 \pm 0.02$	$13.50 \pm 0.18$	$0.63 \pm 0.01$	$5.95 \pm 0.12$
12	$0.73 \pm 0.02$	$14.62 \pm 0.21$	$0.65 \pm 0.02$	$6.93 \pm 0.16$

### 2.1.2. 纳米 $\text{TiO}_2$ 多孔薄膜宏观量的优化

在影响电池性能宏观量参数中, $\text{TiO}_2$  薄膜的厚度、薄膜的结构和薄膜的表面处理对电池性能参数影响最大.图 2 为不同薄膜结构获得的电池性能参数.图 3 为不同薄膜厚度( $L$ )获得的电池光电转换效率.通过对电池表面的处理(如  $\text{TiCl}_4$  处理),可以改变薄膜表面的性能,从而提高电池的整体性能.表 2 列出了  $\text{TiCl}_4$  处理前后电池性能参数的变化情况.

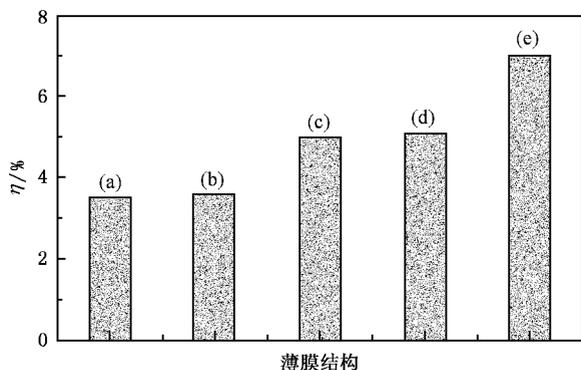


图 2 不同结构的薄膜与效率的关系 (a)为透明单层膜(3  $\mu\text{m}$ )(b)为不透明单层膜(3  $\mu\text{m}$ )(c)为透明单层膜(9  $\mu\text{m}$ )(d)为不透明单层膜(9  $\mu\text{m}$ )(e)为多层膜(9  $\mu\text{m}$ )

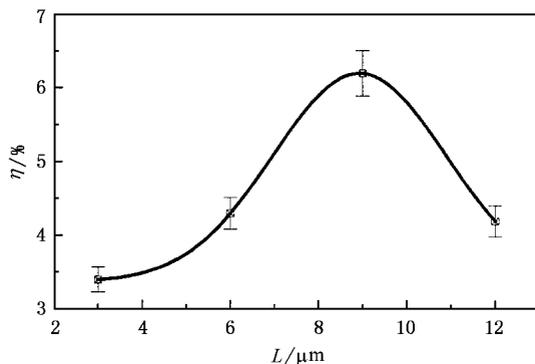


图 3  $\text{TiO}_2$  多孔膜厚度  $L$  与光电转换效率  $\eta$  的关系

表 2  $\text{TiCl}_4$  表面处理纳米多孔  $\text{TiO}_2$  薄膜对电池性能的影响

	$V_{oc}/V$	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$F$	$\eta/\%$
$\text{TiCl}_4$ 表面处理前	$0.70 \pm 0.02$	$13.83 \pm 0.15$	$0.65 \pm 0.01$	$6.26 \pm 0.12$
$\text{TiCl}_4$ 表面处理	$0.71 \pm 0.02$	$15.44 \pm 0.2$	$0.64 \pm 0.01$	$6.94 \pm 0.15$

DSCs 的光吸收可以通过  $\text{TiO}_2$  薄膜内的多次散射和折射得到提高.有效散射需要一定的大颗粒,同时大颗粒的加入会降低薄膜的比表面积  $S_{BET}$ ,从而减少染料的吸附量.要提高对染料的吸附量,亦即



表性的无机染料的分子结构图.其中以 N3 ,N719 染料最为常用,它们同属于羧酸多吡啶染料.

羧酸多吡啶染料有着良好的吸附基团(羧基),可以和纳米  $\text{TiO}_2$  表面很好键合,从而使得电子的注入效率最高.其缺点是在  $\text{pH} \geq 5$  的水溶液中容易从  $\text{TiO}_2$  表面脱附.1993 年,Nazeeruddin 等合成了形如  $\text{RuL}_2\text{X}_2$  ( $L = 2'$ -bipyridine 4,4'-dicarboxylate acid, $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{CN}, \text{NCS}$ ) 的系列染料敏化剂<sup>[18]</sup>,并用其中的 N719 染料作为敏化剂,报道了光电能量转换效率达 10%.1997 年 Nazeeruddin 等<sup>[19]</sup>研制出了被称为“黑染料(black dye)”的 N749 染料[结构为:  $(\text{Bu}_4\text{N})_n\text{Ru}(\text{H}_{4-n}\text{-tctpy})(\text{NCS})_2$  (tctpy:三联吡啶三羧酸, $n = 1-3$ )],以其作为染料敏化剂,在 2001 年获得光电转换效率为 10.4%.最近 Wang 等<sup>[20,21]</sup>开发了一种新型的两亲性羧酸多吡啶染料,使得染料在纳米半导体表面的吸附性能有了较大幅度的提高,增强 DSCs 的稳定性.磷酸多吡啶的最大特点是在较高的 pH 值下,也不易从纳米  $\text{TiO}_2$  表面脱附.Péchy 等<sup>[22]</sup>研究表明:磷酸作为吸附基团的染料即使暴露于  $\text{pH} = 0-9$  的水中,也不会脱附,但磷酸多吡啶的最大缺点是分子中磷酸基团不能和多吡啶平面很好共轭,电子激发态寿命较短,不利于电子的注入.

多核联吡啶的优点是可以选择不同的配

体,逐渐改变染料分子的基态和激发态的性质,从而能使其吸收光谱与太阳光谱更好地匹配,增加对自然光的吸收效率.多核联吡啶的缺点是在单核多吡啶染料光吸收效率极低的长波区域,多核联吡啶的天线效应并不能增加它的光吸收效率.而且,此类染料由于分子体积较大,比单核染料分子更难进入纳米  $\text{TiO}_2$  的空穴中,单位面积上吸附的染料分子数减少,从而限制了光吸收效率<sup>[23]</sup>.

纯有机染料种类繁多,特点是成本较低、吸光系数高、便于进行结构设计.由纯有机染料敏化的 DSCs 的光电转换效率目前还较低,且染料的长期稳定性也是个值得进一步探讨的问题.纯有机染料敏化剂还很难与羧酸联吡啶类染料敏化剂相媲美.目前在 DSCs 中有应用报道的有机染料有香豆素<sup>[24-26]</sup>、胡萝卜素<sup>[27]</sup>、部花菁<sup>[28]</sup>、卟啉<sup>[29]</sup>、叶绿素<sup>[30]</sup>等天然的或者合成的染料.图 5 所示为几种香豆素染料的分子结构图.应用香豆素染料作敏化剂,已经获得了与 N719 染料接近的光电转换效率(7.7%),代表了有机染料敏化的 DSCs 的新成果<sup>[25]</sup>.

迄今为止,很多研究小组已对染料的性能进行了优化研究<sup>[31-33]</sup>,通过实验发现,染料光敏化剂在 DSCs 的应用中性能优越的是 N719,同时染料的纯度、染料吸附量和染料吸附方式对电池性能还有一定的影响.表 6 给出了染料 N719 纯化前后的电池性

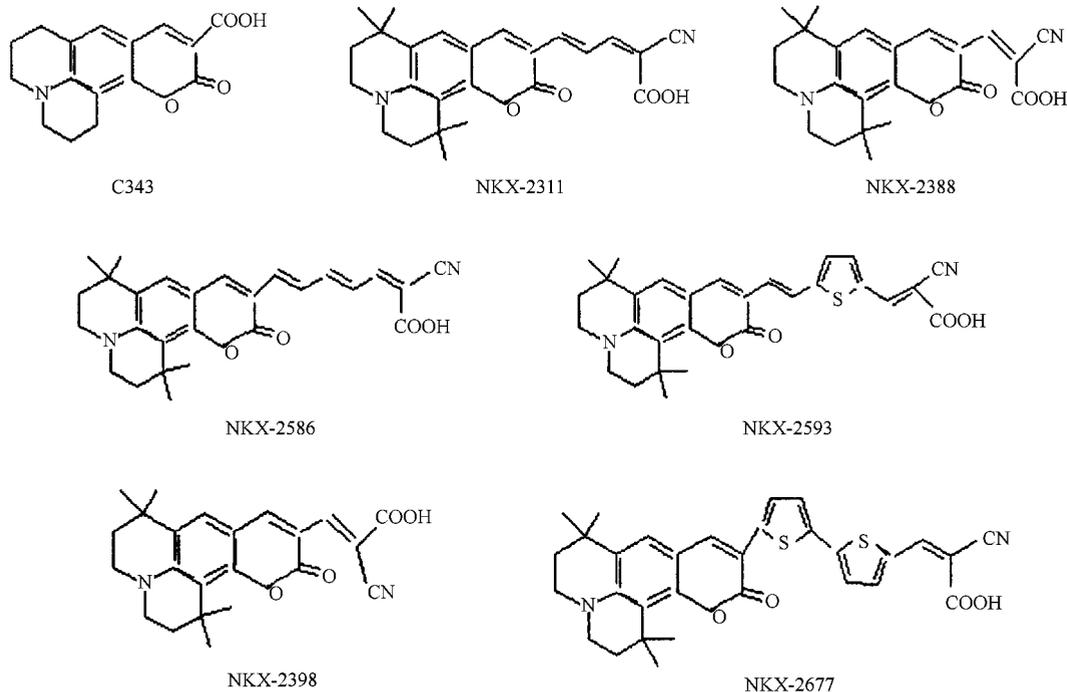


图 5 几种香豆素染料结构图

能参数.从表 6 可以看出,染料纯化后电池性能得到了很大的改善.表 7 给出了染料 N719 和 N749 及混合使用的电池性能参数对比,虽然 N749 的可见光吸收光谱比 N719 吸收光谱要宽,但电池性能并没有提高.

表 6 染料 N719 纯度对电池性能的影响

	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$V_{oc}/\text{V}$	$F$	$\eta/\%$
纯化前	$10.12 \pm 0.22$	$0.69 \pm 0.02$	$0.66 \pm 0.02$	$4.61 \pm 0.1$
纯化后	$15.33 \pm 0.25$	$0.72 \pm 0.02$	$0.62 \pm 0.01$	$6.84 \pm 0.2$

表 7 不同染料对电池性能的影响

	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$V_{oc}/\text{V}$	$F$	$\eta/\%$
N719	$16.65 \pm 0.26$	$0.70 \pm 0.02$	$0.62 \pm 0.16$	$7.23 \pm 0.12$
N749	$14.93 \pm 0.22$	$0.67 \pm 0.02$	$0.60 \pm 0.1$	$6.00 \pm 0.1$
N749/N719 = 1:1	$16.12 \pm 0.24$	$0.64 \pm 0.02$	$0.56 \pm 0.13$	$5.77 \pm 0.15$

### 2.3. 电解质的优化组合

在电解质中,溶剂是一个关键的因素,性能优良而稳定的溶剂是电池实用化必不可少的条件. DSCs 中的溶剂除了应具备介电常数大、黏度小的条件外,与  $\text{I}_2$  的相互作用也是必须考虑的.由于  $\text{I}_2$  本身的性质,溶剂与  $\text{I}_2$  的相互作用以 Lewis 酸碱作用(EPD-EPA)和色散力为主. EPD-EPA 作用的大小以溶剂的给电子数  $N_e$  值来衡量,而色散力的大小可以用折光率  $n$  来表示.由于两者都涉及溶剂分子的可极化度  $\alpha$ ,所以在大多数情况下  $N_e$  和  $n$  的变化趋势是一致的,即  $N_e$  越大  $n$  也越大<sup>[34]</sup>.适当增大溶剂与  $\text{I}_2$  的相互作用可以有效地抑制暗电流而提高光电压,如溶剂与  $\text{I}_2$  的作用过强,就意味着溶剂的极化度很大,那么溶剂分子本身就有可能由于易被激发而变得不稳定,从而影响电池寿命.同时还需要考虑的是电解质体系与染料的可溶性,通过总体性能的考虑和评价,目前腈类溶剂依然是液体电解质中性能最好的.我们通常采用腈类物质作为电解质的溶剂,主要是因为它的介电常数较大、黏度较小、 $N_e$  值适中.另外,腈基本身的键能很大,相对稳定性较好.现在常用的腈类溶剂有乙腈、戊腈、甲氧基丙腈、戊二腈等.表 8 为使用不同电解质溶剂获得的 DSCs 性能参数,从实验电池的总体测试性能来看,乙腈、戊腈和甲氧基丙腈的性能要优越一些.

在液体电解质中,碘盐阳离子也是影响电池效率的重要因素之一.阳离子在  $\text{TiO}_2$  表面的吸附可以改变  $\text{TiO}_2$  的表面能级,从而影响电子从染料激发态

表 8 不同电解质溶剂获得的 DSCs 性能参数对比

	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$V_{oc}/\text{V}$	$F$	$\eta/\%$
乙腈	$12.6 \pm 0.1$	$0.67 \pm 0.01$	$0.66 \pm 0.01$	$7.1 \pm 0.1$
3-甲氧基丙腈	$12.4 \pm 0.1$	$0.70 \pm 0.01$	$0.63 \pm 0.01$	$7.0 \pm 0.1$
戊腈	$13.2 \pm 0.02$	$0.68 \pm 0.01$	$0.60 \pm 0.02$	$6.9 \pm 0.2$
$\gamma$ -丁内酯	$11.7 \pm 0.01$	$0.70 \pm 0.01$	$0.63 \pm 0.03$	$6.6 \pm 0.2$
间甲基苯腈	$12.9 \pm 0.2$	$0.67 \pm 0.01$	$0.52 \pm 0.02$	$5.8 \pm 0.2$
二甲基戊二腈	$10.4 \pm 0.1$	$0.67 \pm 0.01$	$0.60 \pm 0.01$	$5.4 \pm 0.1$
戊二腈	$9.2 \pm 0.1$	$0.70 \pm 0.01$	$0.66 \pm 0.02$	$4.9 \pm 0.1$

注:电解质中其他组分为  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{ I}_2$ ,  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{ HMII}$ ,  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{ TBP}$ ,  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{ LiI}$ .光强为  $78 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

到  $\text{TiO}_2$  的传输.另外,阳离子还可以通过在  $\text{TiO}_2$  表面的吸附改变  $\text{I}^-$  的氧化还原机制,加速上述反应.所以,适当地选择阳离子的种类及浓度,可以有效地改善电池的性能.实验证明,电解质中的碘盐以烷基咪唑碘盐为最佳,可以获得较高的填充因子和光电转换效率.常用的烷基咪唑碘盐主要是 1,2-二甲基-3-丙基咪唑碘(DMPII)、1-甲基-3-丙基咪唑碘(MPII)和 1-甲基-3-己基咪唑碘(HMII),这些相同浓度的碘盐溶液中的  $\text{I}_3^-/\text{I}^-$  的氧化还原性能以及它们对 DSCs 性能的影响,未见有很明显的区别(见图 6 和表 9).

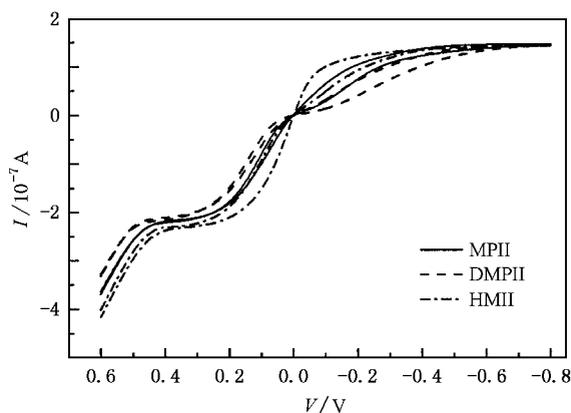


图 6 烷基咪唑碘盐稳态伏安特性曲线

表 9 不同烷基咪唑碘盐( $0.6 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ )对 DSCs 性能的影响

烷基咪唑 盐碘	$V_{oc}/\text{V}$	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$F$	$\eta/\%$
MPII	$0.72 \pm 0.02$	$13.31 \pm 0.20$	$0.64 \pm 0.02$	$6.23 \pm 0.10$
HMII	$0.73 \pm 0.02$	$13.74 \pm 0.18$	$0.65 \pm 0.01$	$6.48 \pm 0.15$
DMPII	$0.72 \pm 0.02$	$13.80 \pm 0.15$	$0.65 \pm 0.01$	$6.48 \pm 0.16$

此外,在电解质溶液中适当地添加阳离子  $\text{Li}^+$ ,可以明显地增大光电流,如图 7 所示.

电解质中的其他成分,如添加剂叔丁基吡啶

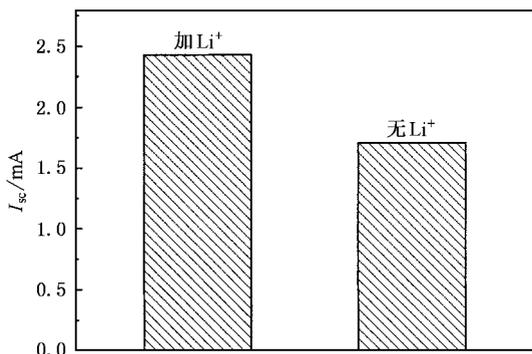


图 7 加入 Li<sup>+</sup> 前后的短路电流比较

(TBP)能够吸附在 TiO<sub>2</sub> 表面未完全配位的 Tl(IV) 原子上,减少 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 TiO<sub>2</sub> 导带电子的复合概率,从而提高 DSCs 的性能(见表 10)。

表 10 TBP 浓度对 DSCs 性能的影响

TBP 浓度/ mol·dm <sup>-3</sup>	V <sub>oc</sub> /V	J <sub>sc</sub> /mA·cm <sup>-2</sup>	F	η/%
0.00	0.55 ± 0.02	13.77 ± 0.2	0.56 ± 0.02	4.24 ± 0.1
0.25	0.67 ± 0.02	13.75 ± 0.16	0.65 ± 0.01	5.57 ± 0.2
0.50	0.72 ± 0.02	13.80 ± 0.24	0.65 ± 0.015	6.48 ± 0.25
0.75	0.71 ± 0.02	13.77 ± 0.21	0.63 ± 0.02	6.44 ± 0.15
1.00	0.70 ± 0.02	13.72 ± 0.16	0.60 ± 0.02	6.42 ± 0.21

### 2.4. 反电极的优化组合

反电极也称为光阴极,由透明导电氟掺杂 SnO<sub>2</sub> (SnO<sub>2</sub>:F)膜构成,主要用于收集电子.反电极除了起光阴极作用以外,另一个重要作用是催化作用,加速 I<sub>3</sub><sup>-</sup>/I<sup>-</sup> 以及阴极电子之间电子交换速度,这就需要在反电极上镀一层 Pt(约 5—10 μg/cm<sup>2</sup>).Pt 可以大大提高 I<sub>3</sub><sup>-</sup>/I<sup>-</sup> 以及阴极电子之间的电子交换反应,另外厚的 Pt 层还起着光反射作用。

可以通过多种途径获得 Pt 反电极,如采用电子束蒸发、直流磁控溅射以及热解等方法,直接在导电 SnO<sub>2</sub> 膜上获得;也可以通过制作浆料,采用丝网印刷的方法获得均匀的催化 Pt 层;还可以通过纳米自组装技术也可以获得结构更为均匀的纳米 Pt 催化层.用不同方法获得的 Pt 反电极,都能起到催化作用,但性能略有区别.图 8 为反电极经过热解法镀 Pt 处理前后电极电阻的情况.从图 8 可以明显看出:镀 Pt 后电极的电阻明显减少,而没有镀 Pt 的电极的电阻相当大.图 9 为通过丝网印刷的方法获得反电极的循环伏安特性,其交换电流密度达到 25 mA/cm<sup>2</sup>,

满足 DSCs 的要求.

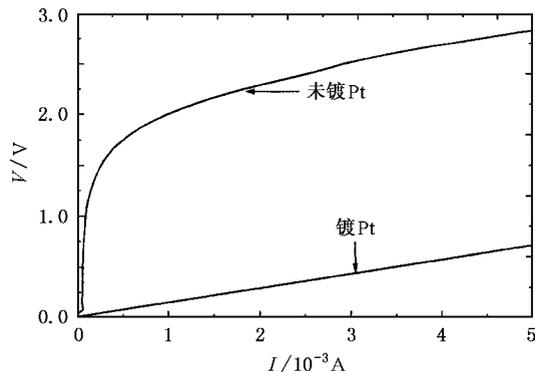


图 8 镀 Pt 对反电极性能的影响

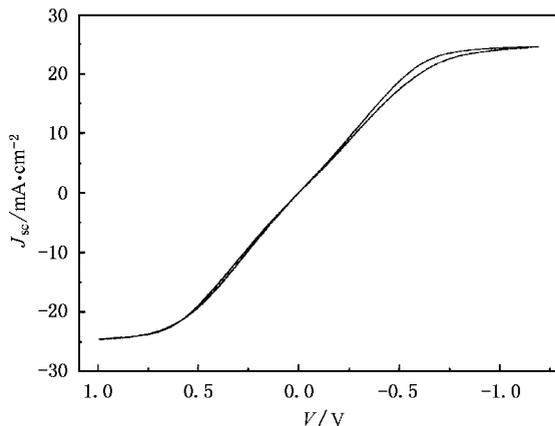


图 9 丝网印刷 Pt 反电极的循环伏安特性测试

没有 Pt 层的透明电极(采用透明导电玻璃(TCO)制作)的电荷传输电阻(R<sub>CT</sub>)非常大,它对防止电池短路起着至关重要的作用.若把 Pt 电极在空气中放置几天后,则发现电阻率从 2 Ω·cm<sup>2</sup> 升至 100 Ω·cm<sup>2</sup>,电极电阻率明显增大的原因在于 Pt 层被空气污染,而这种现象在电池中却不易发生。

### 2.5. 透明电极的优化组合

在 DSCs 中,透明电极 TCO,既要保证电池电流的收集,又要保证可见光透射,这是一种矛盾的关系.目前商业导电玻璃中导电薄膜主要有 SnO<sub>2</sub>:F、氧化铟锡(ITO)薄膜和掺杂的 ZnO 薄膜等,可见光透过率在 70%—90%左右,方块电阻在 8—25 Ω.在 DSCs 的制备中,由于需要经过 400—600 °C 的烧结过程,而 ITO 在 300 °C 以上其电阻率会迅速增加,以致于无法满足 DSCs 的性能要求.目前 DSCs 中常用的是以 SnO<sub>2</sub>:F 为导电膜的导电玻璃.为了获得最佳电

池性能,就必须兼顾到透明电极的透光率和表面电阻两项参数,对此作出一个折衷的选择.同时,也可以采用提高导电玻璃表面绒度的方法来提高透光率,这一点已在非晶硅太阳电池中得到验证.从表

11 可以看出,导电玻璃表面电阻对电池性能有一定的影响,在同样条件下,表面电阻小可见光透过率就低.就总体性能而言,表面方块电阻在  $15 \Omega$  的导电玻璃有较好的性能.

表 11 不同导电玻璃获得的 DSCs 性能参数对比

$\text{SnO}_2:\text{F}$ 方块电阻/ $\Omega$	平均透光率/%	$V_{oc}/\text{V}$	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$F$	$\eta/\%$
30	78	$0.69 \pm 0.01$	$14.3 \pm 0.1$	$0.61 \pm 0.01$	$6.0 \pm 0.25$
15	75.5	$0.71 \pm 0.01$	$14.9 \pm 0.1$	$0.66 \pm 0.01$	$7.04 \pm 0.21$
8	72.6	$0.70 \pm 0.01$	$14.5 \pm 0.02$	$0.675 \pm 0.02$	$6.85 \pm 0.18$

注:实验使用的导电玻璃为 LOF 公司产品,电池的正负电极均采用相同的导电玻璃.

### 3. 总 结

通过对 DSCs 中各个关键技术的优化和组合,可以获得较高的光电转换效率.图 10 为我们综合了以上各项技术的优势获得的 DSCs 伏安特性曲线(电池有效面积为  $0.21 \text{ cm}^2$ ),电池光电转换效率接近 9%.

在 DSCs 中,纳米多孔  $\text{TiO}_2$  薄膜、染料光敏化剂、电解质、反电极和透明电极这些部分相互关联,各部分的优化组合是影响 DSCs 性能的关键所在.在现有的技术和研究基础上,实际的光电转换效率还没有超过 12%,这与 DSCs 光电转换效率的理论计算值(27%)相差较远.相信在今后的实验中,除了对关键技术作进一步的优化组合外,还需提高部分材料的性能,这也是未来取得突破的关键.

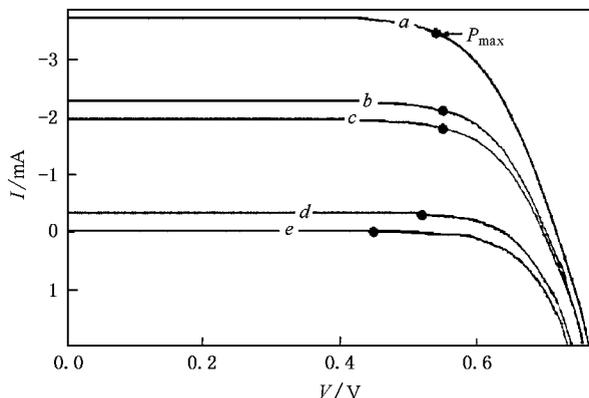


图 10 电池伏安特性曲线 曲线 a:光强 96.1%,光电转换效率 8.95%;曲线 b:光强 58.5%,光电转换效率 9.18%;曲线 c:光强 49.8%;曲线 d:光强 9.1%;曲线 e:光强 1.3%.光强以一个太阳(AM1.5)为单位

- [1] O'Regan B, Grätzel M 1991 *Nature* **353** 737
- [2] Grätzel M 2003 *J. Photochem. Photobio. C* **4** 45
- [3] Sommeling P M, Späth M, Smit H J P et al 2004 *J. Photochem. Photobio. A* **164** 137
- [4] Robert F 2003 *Science* **300** 1219
- [5] Dai S Y, Wang K J, Wu Q C et al 1997 *Acta Energetiae Sol. Sin.* **18** 228 (in Chinese) [戴松元、王孔嘉、邬钦崇等 1997 太阳能学报 **18** 228]
- [6] Dai S Y, Wu Q C, Wang K J et al 1996 *Acta Energetiae Sol. Sin.* **17** 220 (in Chinese) [戴松元、邬钦崇、王孔嘉等 1996 太阳能学报 **17** 220]
- [7] Li X P, Zhang Z C, Li W Y et al 2002 *Acta Energetiae Sol. Sin.* **23** 281 (in Chinese) [李学萍、张正诚、李维盈等 2002 太阳能学报 **23** 281]
- [8] Wang R B, Dai S Y, Wang K J 2002 *J. Funct. Mater.* **3** 296 (in Chinese) [王瑞斌、戴松元、王孔嘉 2002 功能材料 **3** 296]
- [9] Wang R B, Dai S Y, Wang K J 2001 *J. Graduate School CAS* **18** 28 (in Chinese) [王瑞斌、戴松元、王孔嘉 2001 中国科学院研究生院学报 **18** 28]
- [10] Hu L H, Dai S Y, Wang K J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2135 (in Chinese) [胡林华、戴松元、王孔嘉 2003 物理学报 **52** 2135]
- [11] Dai S Y, Wang K J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 953
- [12] Palomares E, Clifford J N, Haque S A et al 2003 *J. Am. Chem. Soc.* **125** 475
- [13] Diamant Y, Chen S G, Melamed O et al 2003 *J. Phys. Chem. B* **107** 1977
- [14] Bedja I, Hotchandani S, Kamat P V 1994 *J. Phys. Chem.* **98** 4133
- [15] Katoh R, Furube A, Hara K et al 2002 *J. Phys. Chem. B* **106** 12957
- [16] Wang R B 2001 *M. S. Thesis* (Hefei: Institute of Plasma Physics, CAS) (in Chinese) [王瑞斌 2001 硕士学位论文(合肥:中国科

- 学院等离子体物理研究所)]
- [ 17 ] Hou Y J 1997 *Ph. D. Thesis* ( Beijing : Institute of Photographic Chemistry , CAS)( in Chinese )[ 侯原军 1997 博士学位论文( 北京 :中国科学院感光化学研究所 )]
- [ 18 ] Nazeeruddin M K , Kay A , Rodicio I *et al* 1993 *J. Am. Chem. Soc.* **115** 6382
- [ 19 ] Nazeeruddin M K , Péchy P , Renouard T *et al* 2001 *J. Am. Chem. Soc.* **123** 1613
- [ 20 ] Wang P , Zakeeruddin S M , Exnar I *et al* 2002 *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 2972
- [ 21 ] Wang P , Zakeeruddin S M , Moser J E *et al* 2003 *Nat. Mater.* **2** 402
- [ 22 ] Péchy P , Rotzinger P , Nazeeruddin M K *et al* 1995 *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 65
- [ 23 ] Kubo W , Kambe S , Nakade S *et al* 2003 *J. Phys. Chem. B* **107** 4374
- [ 24 ] Kohjiro H , Kazuliro S , Yasuyo O *et al* 2001 *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 569
- [ 25 ] Hara K , Tachibana Y , Ohga Y *et al* 2003 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **77** 89
- [ 26 ] Hara K , Kurashige M , Dan-oh Y *et al* 2003 *New J. Chem.* **27** 783
- [ 27 ] Frand G , Bard A J , Kispert L D 2000 *J. Photochem. Photobio. A* **130** 49
- [ 28 ] Tingli M , Inoue K , Noma H *et al* 2002 *J. Photochem. Photobio. A* **152** 207
- [ 29 ] Cherian S , Wamser C C 2000 *J. Phys. Chem. B* **104** 3624
- [ 30 ] Kay A , Grätzel M 1993 *J. Phys. Chem.* **97** 6272
- [ 31 ] Xie P H , Zhang L Q , Hou Y J *et al* 2000 *Chin. J. Chem.* **18** 152
- [ 32 ] Xie P H , Wei T X , Hou Y J *et al* 2000 *Inorg. Chim. Acta* **308** 73
- [ 33 ] Hou Y J , Xie P H , Wu K W *et al* 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **70** 131
- [ 34 ] Hara K , Horiguchi T , Kinoshita T *et al* 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **70** 151

## Investigation on the dye-sensitized solar cell<sup>\*</sup>

Dai Song-Yuan<sup>†</sup> Kong Fan-Tai Hu Lin-Hua Shi Cheng-Wu Fang Xia-Qin Pan Xu Wang Kong-Jia

( *Institute of Plasma Physics , Chinese Academy of Sciences , Hefei 230031 , China* )

( Received 21 April 2004 ; revised manuscript received 5 November 2004 )

### Abstract

The key technologies in dye-sensitized solar cell , including nanoporous TiO<sub>2</sub> film , dye-sensitizer , electrolyte , platinum catalysis , and TCO glass , have been investigated , and we also optimized the different technologies with assembling the small area dye-sensitized solar cells. About 9% photo-electric conversion efficiency has been demonstrated in our lab under AM1.5 solar simulator. Our results show that there would be a possibility for commercial production based on our technologies.

**Keywords :** dye-sensitized , solar cell , optimum , efficiency

**PACC :** 8630J , 7360F , 8100 , 8610K

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China( Grant No. G2000028206 ).

<sup>†</sup>E-mail : sydai@ipp. ac. cn