

基于半经验模型对大面积染料敏化太阳电池性能影响因素的研究*

吴宝山 王琳琳 汪咏梅 马廷丽†

(大连理工大学化工学院精细化工国家重点实验室, 大连 116024)

(2011年5月27日收到; 2011年7月27日收到修改稿)

以影响大面积染料敏化太阳电池性能的几个物理参量和几何参量为切入点, 分析了内部电阻对电池性能的影响, 针对几种构型不同的大面积电池, 建立了效率的半经验模型. 根据并联、串联、和各单元独立式串并联的大面积电池的相关物理参量和几何参量, 对电池效率进行了计算. 通过比较计算值与测试值的偏差, 分析了半经验模型的适用性. 在半经验模型的基础上, 分析了相关物理参量和几何参量对电池性能的影响. 结果表明, 在实际应用中, 通过半经验模型分析物理参量和几何参量的影响, 可以优化大面积电池的性能.

关键词: 染料敏化, 太阳电池, 大面积, 半经验模型

PACS: 88.40.jr, 73.63.Bd, 73.50.Pz, 88.10.gc

1 引言

经过 20 年的发展, 染料敏化太阳电池 (dye-sensitized solar cells, DSCs) 的实验室小面积电池光电转化效率由最初的 7.1%^[1] 提高至 11% 以上^[2], 高效的大面积 DSC 作为其商品化应用的基础, 越发引起广泛的关注.

研究表明, 大面积 DSC 的光电转化效率不仅受多种因素的影响, 同时各因素之间也存在着相互制约, 这种复杂的相关性正是目前制约大面积 DSC 效率提升的关键所在. 因而, 将大面积 DSC 的光电性能与对其影响的各种因素结合在一起, 得到一种接近于实际情况的模型是解决大面积 DSC 性能复杂相关性的有效途径.

目前, 对大面积 DSC 效率的模拟计算报道不多. 戴松元等人^[3] 以串联电阻产生的功率损耗为切入点, 模拟计算了金属栅电极的性能对方形长条 DSC 效率的影响; 同时, 通过连续性方程和等效电路, 分析了不同内部电阻条件下电池的光电性能, 以及电池在不同光照条件下的光电性能变化^[4]. Toivola 等人^[5] 通过研究电池中电流的偏微分方程, 建立了不同基板电阻对电池性能影响的半经验模

型, 模拟计算了特定导电基板对大面积 DSC 效率的影响. Meng 等人^[6] 根据基尔霍夫定律模拟了电池的伏安特性, 考察了电池工作状态的同步性对大面积 DSC 性能的影响. 这些研究为大面积 DSC 的理论研究奠定了一定的基础.

为了利用建立的模型解决大面积 DSC 性能的复杂相关性, 采用根据多种因素结合太阳电池效率的计算公式和太阳电池填充因子的数学近似建立模型的方法, 分析多种因素对大面积 DSC 性能的综合影响; 为了使建立的模型能够贴切地反映大面积 DSC 的性能, 采用理论分析和实际测试相结合的半经验方法.

因而, 本文以与大面积 DSC 效率直接相关的几个物理参量和几何参量为切入点, 根据多个参量建立了适用于几种构型大面积 DSC 效率的半经验模型, 分析了半经验模型的适用性和相关参量对电池性能的影响.

2 实验部分

2.1 电池的制作

电池材料制备方法和电池封装工艺为: 利用

* 国家自然科学基金 (批准号: 50773008) 和国家高技术研究发展计划 863 计划项目 (批准号: 2009AA03Z220) 资助的课题.

† E-mail: tinglima@dlut.edu.cn

激光刻蚀机对 FTO 导电玻璃基板进行刻蚀加工处理; 利用 P25 粉体的 TiO_2 浆料, 使用印刷法制备 TiO_2 电极; 使用喷涂法, 高温热还原制备铂电极; 使用印刷法制备银栅电极; 使用联吡啶钌配合物 N719 染料对 TiO_2 电极进行敏化; 使用热熔高分子薄膜 (Surllyn 1702) 封装电池; 采用 3- 甲氧基丙腈 (MPN) 作为溶剂的 I_3^-/I^- 的电解液.

2.2 电池性能的测试

电池性能的测试包括: I - V 测试 (光源: PEC-L15, Peccell, Japan; 数字源表: Keithley 2601, Keithley, USA; 光照条件: AM1.5, 100 mW/cm^2 ^[7]) 和电化学阻抗谱测试 (EIS, Zenium Zahner, Germany).

2.3 大面积 DSC 效率的半经验模型

根据太阳能电池光电转化效率 (η) 的计算公式 (方程 (1)) 可知, 填充因子 (FF) 与效率 (η) 成正比. 填充因子可以根据方程 (2) 计算得到, 其中 $V_{P\max}$ 和 $I_{P\max}$ 分别表示最大功率条件下的电压和电流值, 填充因子更多地表现为电池体系中寄生的串联电阻 (R_s) 与分路电阻 (R_{sh}) 对电池效率的综合影响^[8].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{\text{FF} \cdot I_{\text{SC}} \cdot V_{\text{OC}}}{P_{\text{in}}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$\text{FF} = \frac{P_{\max}}{I_{\text{SC}} \cdot V_{\text{OC}}} = \frac{I_{P\max} \cdot V_{P\max}}{I_{\text{SC}} \cdot V_{\text{OC}}}. \quad (2)$$

在 DSC 体系中, 标准光照条件下^[7], 染料激发态的高能电子注入二氧化钛半导体费米能级的时间常数为 10^{-11} — 10^{-13} s, 二氧化钛半导体导带中电子扩散传输的时间常数为 10^{-3} s, 二氧化钛半导体导带中电子传输至 I_3^- 的时间常数为 10^{-2} s^[9]. 对于 DSC 体系, 二氧化钛/染料/电解液界面处, 电子的复合十分有限, 即分路电阻非常大, 可达 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ^[10]. 因而, 分路电阻对填充因子的影响十分有限, 特别是对于大面积 DSC, 与分路电阻相比, 串联电阻对电池填充因子的影响占主体^[11]. DSC 的串联电阻由欧姆电阻 (包括金属栅电极电阻、导电基质电阻和接触电阻)、对电极/电解液界面的电荷转移电阻、电解液中 I_3^- 的能斯特扩散电阻组成^[12].

根据太阳电池填充因子的研究^[8], 可得到关于填充因子的方程 (3). 其中, r_s 定义为归一化串联电阻; FF_0 定义为电池串联电阻趋近于无穷小的条件下, 电池体系的极限填充因子, 对于 DSC, FF_0 估算为 0.75 至 0.85^[10]. 归一化串联电阻 (r_s) 可以根

据方程 (4) 计算得到, 其中 R_s 表示电池体系的串联电阻; R_{ch} 表示太阳能电池的特性电阻, 可以通过方程 (5) 进行计算. 特性电阻 (R_{ch}) 可进一步由方程 (6) 得到, 定义 α_{ch} 为特性电阻校正因子, 使特性电阻 (R_{ch}) 可以通过开路电压 (V_{OC}) 和短路电流 (I_{SC}) 进行计算. 将方程 (4), (5), (6), 代入方程 (3), 可得到关于填充因子 (FF) 的方程 (7).

$$\text{FF} = \text{FF}_0(1 - r_s), \quad (3)$$

$$r_s = \frac{R_s}{R_{ch}}, \quad (4)$$

$$R_{ch} = \frac{V_{P\max}}{I_{P\max}}, \quad (5)$$

$$R_{ch} = \frac{V_{P\max}}{I_{P\max}} = \frac{1}{\alpha_{ch}} \cdot \frac{V_{\text{OC}}}{I_{\text{SC}}}, \quad (6)$$

$$\text{FF} = \text{FF}_0 \left(1 - R_s \cdot \alpha_{ch} \frac{I_{\text{SC}}}{V_{\text{OC}}} \right). \quad (7)$$

按照实际光照面积对电池效率进行计算^[13], 则入射光功率 (P_{In}) 可以表示为方程 (8). 其中, n 表示构成大面积电池的单元数; S_{unit} 表示大面积电池中每个单元的几何面积; $P_{\text{In-per-ua}}$ 表示单位面积上的入射光功率, 按照 AM1.5 的光照标准, 为 100 mW/cm^2 .

$$P_{\text{In}} = P_{\text{In-per-ua}} \cdot n \cdot S_{\text{unit}}. \quad (8)$$

在工艺稳定的情况下, 大面积 DSC 中各单元的性能相近, 将并联电池中开路电压 ($V_{\text{OC-parallel}}$)、短路电流 ($I_{\text{SC-parallel}}$)、串联电阻 ($R_{S\text{-parallel}}$) 分别用单元数 (n)、各单元最小开路电压 ($V_{\text{OC-unit-min}}$)、各单元平均短路电流密度 ($J_{\text{SC-unit-ave}}$)、各单元活性面积 ($S_{\text{unit-active}}$)、各单元串联电阻 ($R_{S\text{-unit}}$) 表示为方程 (9)—(11); 将串联电池中开路电压 ($V_{\text{OC-series}}$)、短路电流 ($I_{\text{SC-series}}$)、串联电阻 ($R_{S\text{-series}}$) 分别用单元数 (n)、各单元平均开路电压 ($V_{\text{OC-unit-ave}}$)、各单元最小短路电流密度 ($J_{\text{SC-unit-min}}$)、各单元活性面积 ($S_{\text{unit-active}}$)、各单元串联电阻 ($R_{S\text{-unit}}$) 表示为方程 (12)—(14).

$$V_{\text{OC-parallel}} = V_{\text{OC-unit-min}}, \quad (9)$$

$$I_{\text{SC-parallel}} = n \cdot S_{\text{unit-active}} \cdot J_{\text{SC-unit-ave}}, \quad (10)$$

$$R_{S\text{-parallel}} = \frac{R_{S\text{-unit}}}{n}, \quad (11)$$

$$V_{\text{OC-series}} = n \cdot V_{\text{OC-unit-ave}}, \quad (12)$$

$$I_{\text{SC-series}} = J_{\text{SC-unit-min}} \cdot S_{\text{unit-active}}, \quad (13)$$

$$R_{S\text{-series}} = n \cdot R_{S\text{-unit}}. \quad (14)$$

为了更好地分析大面积 DSC 的性能, 基于方程 (15) 和 (16), 设计了如图 1 所示的大面积 DSC 几何模型, 其中, L_{unit} 和 W_{module} 分别表示电池的长度和宽度; W_{interval} 表示相邻单元电极材料之间的间隔宽度; $L_{\text{unit-active}}$ 和 $W_{\text{unit-active}}$ 分别表示单元中电极材料的长度和宽度. 同时, 根据几何模型中几何参量的关系, 可以得到方程 (17) 和 (18).

$$L_{\text{unit}} = W_{\text{interval}} + L_{\text{unit-active}}, \quad (15)$$

$$W_{\text{module}} = n(W_{\text{unit-active}} + W_{\text{interval}}), \quad (16)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{unit-active}} &= L_{\text{unit-active}} \cdot W_{\text{unit-active}} \\ &= (L_{\text{unit}} - W_{\text{interval}}) \\ &\quad \times \left(\frac{W_{\text{module}}}{n} - W_{\text{interval}} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

$$S_{\text{unit}} = L_{\text{unit}} \cdot W_{\text{unit}} = L_{\text{unit}} \cdot \frac{W_{\text{module}}}{n}. \quad (18)$$

将方程 (7)—(11), (17) 和 (18), 代入方程 (1), 可

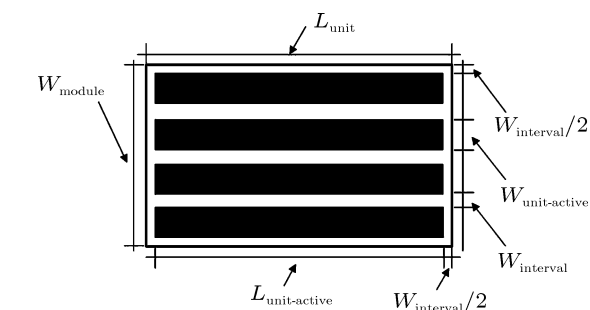


图 1 大面积 DSC 几何模型

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Parallel}} &= \frac{\text{FF}_0}{P_{\text{In-per-ua}}} \frac{(W_{\text{module}} - nW_{\text{interval}}) \cdot (L_{\text{unit}} - W_{\text{interval}})}{W_{\text{module}} \cdot L_{\text{unit}}} \\ &\quad \times \left(V_{\text{OC-unit-min}} \cdot J_{\text{SC-unit-ave}} - R_{\text{S-unit}} \cdot \alpha_{\text{ch}} \cdot \left(\frac{W_{\text{module}}}{n} - W_{\text{interval}} \right) \right. \\ &\quad \left. \times (L_{\text{unit}} - W_{\text{interval}}) \cdot J_{\text{SC-unit-ave}}^2 \right) \times 100\%, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Series}} &= \frac{\text{FF}_0}{P_{\text{In-per-ua}}} \frac{(W_{\text{module}} - nW_{\text{interval}}) \cdot (L_{\text{unit}} - W_{\text{interval}})}{W_{\text{module}} \cdot L_{\text{unit}}} \\ &\quad \times \left(V_{\text{OC-unit-ave}} \cdot J_{\text{SC-unit-min}} - R_{\text{S-unit}} \cdot \alpha_{\text{ch}} \cdot \left(\frac{W_{\text{module}}}{n} - W_{\text{interval}} \right) \right. \\ &\quad \left. \times (L_{\text{unit}} - W_{\text{interval}}) \cdot J_{\text{SC-unit-min}}^2 \right) \times 100\%. \end{aligned} \quad (20)$$

3 结果和讨论

3.1 电池的性能和效率的模拟计算

3.1.1 大面积并联和串联 DSC 的性能和效率的模拟计算

根据 Arakawa 等人^[14]制作的大面积并联电池 (P-DSC) 和 Fukui 等人^[15]制作的大面积串联电池 (S-DSC) 的实验数据, 提取相关的物

理参量和几何参量, 同时设定其各单元的电阻值 ($R_{\text{S-unit}}$) 分别为 0.2—0.6 Ω 和 0.8—1.2 Ω , 见表 1. 将表 1 中 P-DSC 和 S-DSC 的物理参量和几何参量分别代入方程 (19) 和 (20), 计算得到电池的效率分别为 7.28%—8.17% 和 8.34%—8.65%, 测试值 8.01% 和 8.4% 在模拟计算值的范围内, 见表 2 中 P-DSC 和 S-DSC 的数据. 根据计算值和测试的比较, 基本认为效率的半经验模型适用于大面积并联和串联的染料敏化太阳电池.

表1 物理参量和几何参量数据

| 参数依据 | 物理参量 | | | | 几何参量 | | | | | |
|--------|---------------|------------------------|--------------|---------------|--------------|----------------|------------|-------|---|------|
| | $V_{OC-unit}$ | $J_{SC-unit}$ | R_{S-unit} | α_{ch} | W_{module} | $W_{interval}$ | L_{unit} | n | | |
| | /V | /(mA/cm ²) | /Ω | | /cm | /cm | /cm | | | |
| P-DSC | 并联 | 0.71 | 16.80 | 0.2-0.6 | 1.27 | 10.00 | 0.15 | 10.00 | 9 | |
| S-DSC | 串联 | 0.71 | 18.90 | 0.8-1.2 | 1.15 | 5.40 | 0.10 | 5.10 | 9 | |
| H-3DSC | 串联电池 | 0.65 | 10.50 | 2.64 | 1.40 | 3.60 | 0.30 | 6.30 | 3 | |
| | 并联电池 | 0.65 | 10.80 | 2.85 | 1.45 | | | | | |
| | 内部单元 | 最小值 | 0.65 | 10.69 | 2.63 | | | | | 1.33 |
| | | 平均值 | 0.65 | 10.94 | 2.69 | | | | | |
| H-7DSC | 串联电池 | 0.67 | 10.71 | 2.31 | 1.43 | 8.40 | 0.30 | 8.80 | 7 | |
| | 并联电池 | 0.67 | 11.11 | 3.71 | 1.20 | | | | | |
| | 内部单元 | 最小值 | 0.65 | 10.59 | 2.13 | | | | | 1.34 |
| | | 平均值 | 0.66 | 10.86 | 2.21 | | | | | |
| W-1DSC | | 0.71 | 2.96 | 6.50 | 1.04 | | | | 1 | |
| W-2DSC | 内部单元 | 0.68 | 6.53 | 4.10 | 1.15 | 5.00 | 0.30 | 7.00 | 2 | |
| W-3DSC | | 0.70 | 7.38 | 3.18 | 1.32 | | | | | |
| W-4DSC | | 0.70 | 7.05 | 3.06 | 1.26 | | | | | |
| W-5DSC | | 0.70 | 6.77 | 2.49 | 1.21 | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

表2 大面积 DSC 计算效率、测试效率及偏差值

| 参数依据 | $\eta/\%$ | | 偏差值 = 测试值 - 计算值 / % | |
|----------|-----------|------|---------------------|-------|
| | 计算值 | 测试值 | | |
| P-DSC | 电池 | 0.20 | 8.17 | -0.16 |
| | | 0.60 | 7.28 | 0.73 |
| S-DSC | 电池 | 0.80 | 8.65 | -0.25 |
| | | 1.20 | 8.34 | 0.06 |
| H-3DSC-S | 内部单元 | | 2.88 | 0.07 |
| | | 串联电池 | 2.81 | 2.95 |
| H-3DSC-P | 内部单元 | | 2.91 | -0.36 |
| | | 并联电池 | 2.68 | 2.55 |
| H-7DSC-S | 内部单元 | | 2.74 | -0.13 |
| | | 串联电池 | 2.63 | 2.61 |
| H-7DSC-P | 内部单元 | | 2.70 | -0.87 |
| | | 并联电池 | 2.00 | 1.83 |

3.1.2 大面积各单元独立式串并联 DSC 的性能和效率的模拟计算

设计了电池结构如图 2 所示的大面积各单元独立式串并联 DSC(H-DSC), 制作了单元数分别为 3 和 7 的 H-DSC, 分别用 H-3DSC 和 H-7DSC 表示. 此种构型的电池可人为选择性地串联、并联和串并混合连接, 测试的物理参量和电池设计的几何参量见表 1 中 H-3DSC 和 H-7DSC 部分. 电池的并联测试效率见表 2 中 H-3DSC-P 和 H-7DSC-P 部分; 电池的串联测试效率见表 2 中 H-3DSC-S 和 H-7DSC-S 部分.

根据物理参量的依据不同, 电池效率的模拟计算分为两种方式: 1) 根据各内部单元独立测试的物理参量进行计算; 2) 根据各内部单元之间并联连接或串联连接后, 测得的整个电池物理参量进行计算. 效率的计算值, 及其物理参量依据, 列于表 2.

根据表 2 中的数据进行对比可知, 对于 H-3DSC 和 H-7DSC 串联的效率计算, 无论采用各内部单元独立测试的物理参量, 还是串联连接后测得的整个电池物理参量, 效率的测试值和计算值的差值均在 $\pm 0.14\%$ 以内.

根据表 2 中的数据进行对比可知, 对于 H-

3DSC 和 H-7DSC 并联的效率计算, 采用各内部单元独立测试的物理参量, 效率的测试值和计算值的差值分别为 -0.36% 和 -0.87% ; 采用并联连接后测得的整个电池物理参量, 效率的测试值和计算值的差值在 $\pm 0.17\%$ 以内.

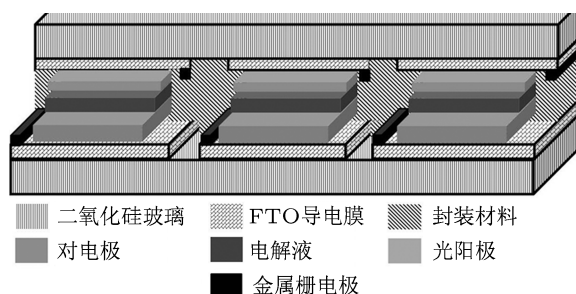


图2 大面积各单元独立式串并联 DSC 结构示意图

对于 H-3DSC 和 H-7DSC, 内部各单元独立测试的 $R_{S-unit-ave}$ 分别为 2.69Ω 和 2.21Ω , 而根据各单元并联的测试数据, 计算出 $R_{S-unit-ave}$ 分别为 2.85Ω 和 3.71Ω . 说明并联连接时, 可能由于外接导线之间的连接问题, 造成根据内部各单元独立测试的物理参量计算 H-3DSC 和 H-7DSC 的并联效率与实际测得的效率偏差过大.

根据计算值和测试值的比较, 可以基本认为效率的半经验模型适用于大面积各单元独立式串并联染料敏化太阳能电池.

3.2 物理参量和几何参量对电池效率的影响

3.2.1 物理参量对电池效率的影响

在效率的半经验模型中, 物理参量包括各单元的开路电压 ($V_{OC-unit}$)、短路电流密度 ($J_{SC-unit}$)、串联电阻 (R_{S-unit}) 和特征电阻校正因子 (α_{ch}). 根据方程 (19) 和 (20) 可知, η 与 $V_{OC-unit}$ 成正比, η 与 R_{S-unit} 和 α_{ch} 成反比. 单元的短路电流密度 ($J_{SC-unit}$) 在方程中存在能量的产生部分和能量的内部消耗部分, 对电池的效率存在正反两向的综合影响, 正反哪种影响占主体需要依照其他参量进行综合判断, 同时发现降低内部单元的串联电阻可以有效地降低内部单元的短路电流密度对效率的负向作用.

因而, 在进一步开发新材料和改进材料制备工艺的同时, 可以通过叠层结构实现大面积 DSC 各内部单元性能的提高, 特别是内部单元开路电压和短路电流密度的提高.

3.2.2 几何参量对电池效率的影响

在效率的半经验模型中, 几何参量包括电池的宽度 (W_{module})、电池的长度 (L_{unit})、相邻单元电极材料之间的间隔宽度 ($W_{interval}$) 和电池的单元数 (n). 在实际应用过程中, W_{module} 和 L_{unit} 受实际空间的限制, 往往是既定的; $W_{interval}$ 与电池封装工艺相关, 在一定的封装工艺条件下, 也为既定值. 这里主要讨论只能取自然数的单元数 n 对效率 η 的影响, 这种影响包括作为方程中的几何参量对效率的直接影响, 和通过影响物理参量进而对效率的间接影响.

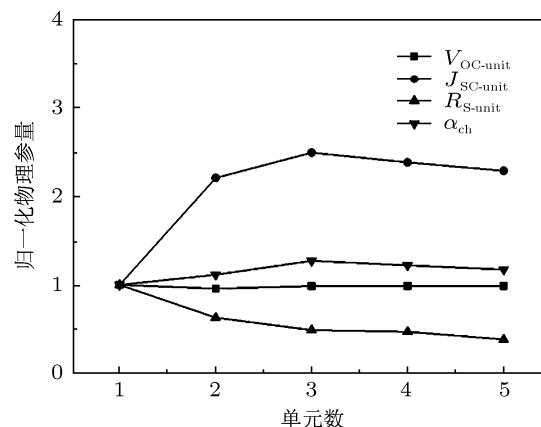


图3 单元数对 $5 \times 7 \text{ cm}^2$ 的 W 形大面积串联 DSC 物理参量的影响

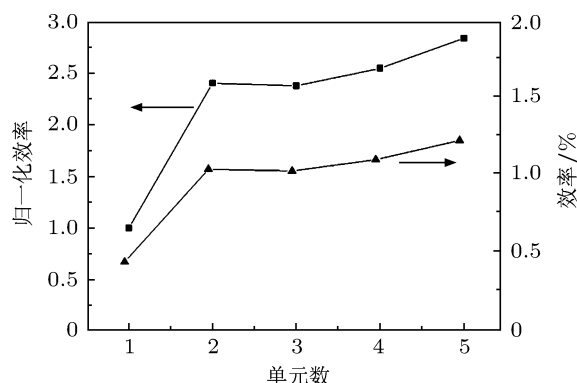


图4 单元数对 $5 \times 7 \text{ cm}^2$ 的 W 形大面积串联 DSC 效率的影响

我们设计和制作了与不同单元数的 W 形串联大面积 DSC 几何参量相应的电池单元, 分别用 W-1DSC, W-2DSC, W-3DSC, W-4DSC 和 W-5DSC 表示, 物理参量和几何参量见表 1. 以归一化的物理参量 (normalized physical parameters) 作为因变量, 单元数 n 作为自变量作图, 讨论电池单元数 n 对方程中物理参量的影响, 如图 3 所示. 根据图 3 可知, 随着单元数 n 的增加, 与 n 对应的每一个单元的宽度降低、长度不变, FTO 导电玻璃的电阻下降, 使单元的 R_{S-unit} 显著降低; 与 n 对应的每一个单元的

宽度降低, 电子在 FTO 导电玻璃表面传输距离下降, 并且单元的 R_{S-unit} 降低, 使单元的 $J_{SC-unit}$ 显著升高; $V_{OC-unit}$ 和 α_{ch} 没有显著的变化.

根据效率的方程 (20), 可得单元数 n 对电池性能的综合影响, 分别以效率值 η 和归一化的效率值 (normalized efficiency) 为因变量, n 为自变量作图, 见图 4. 根据图中的曲线变化趋势可以发现, 对于 $5 \times 7 \text{ cm}^2$ 的 W 形大面积串联 DSC, 单元数由 1 增加至 5 的过程中, 随着单元数的增加, 电池的效率也明显上升.

因而, 考虑到各单元几何参量对物理参量的影响, 在使用的电极材料、材料制备工艺、封装工艺、实际应用空间一定的条件下, 可以通过效率的半经验模型确定最优的大面积染料敏化太阳电池单元数, 进而确定各内部单元的几何尺寸, 从而

通过几何尺寸的设计实现大面积 DSC 整体效率的提升.

4 结论

本文以几个物理参量和几何参量为切入点, 尝试建立了大面积 DSC 效率的半经验模型. 通过测试和分析并联、串联和各单元独立式串并联几种构型的大面积 DSC 的物理参量和几何参量, 根据效率的计算结果初步验证了半经验模型的适用性. 分析物理参量和几何参量对电池性能影响的同时, 通过参量的相关性, 分析实际应用中大面积电池性能的优化方法. 相信研究结果将为设计大面积 DSC 的构型结构和提高电池效率提供相关的依据, 为染料敏化太阳电池的应用基础研究奠定一定的基础.

- [1] O'Regan B, Grätzel M 1991 *Nature* **353** 737
- [2] Chiba Y, Islam A, Watanabe Y, Komiya R, Koide N, Han L 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 638
- [3] Huang Y, Dai S Y, Cheng S H, Hu L H, Kong F T, Kou D X, Jiang N Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 644 (in Chinese) [黄阳, 戴松元, 陈双宏, 胡林华, 孔凡太, 寇东星, 姜年权 2010 物理学报 **59** 644]
- [4] Huang Y, Dai S, Chen S, Zhang C, Sui Y, Xiao S, Hu L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 243503
- [5] Toivola M, Peltola T, Miettunen K, Halme J, Loud P 2010 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **10** 1078
- [6] Zhang Y D, Huang X M, Gao X M, Yang Y Y, Luo Y H, Li D M, Meng Q B 2011 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 2564
- [7] Green M A, Emery K, King D L, Hisikawa Y, Warta W 2006 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **14** 45
- [8] Green M A (Translated by Li X W, Xie H L, Zhao H B) 1987 *Solar Cells: Operation Principles Technology and Systems Applications* (Beijing: Electronic Industry Press) pp76–93 (in Chinese) [格林 M A. 著李秀文, 谢鸿礼, 赵海滨译 1987 太阳电池工作原
- 理、工艺和系统的应用 (北京: 电子工业出版社) 第 76– 第 93 页]
- [9] Hagfeldt A, Boschloo G, Sun L, Kloo L, Pettersson H 2010 *Chem. Rev.* **110** 6595
- [10] Koide N, Islam A, Chiba Y, Han L 2006 *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **182** 296
- [11] Liu Y Q 2011 *Organic Nano-scale and Molecular Devices* (Beijing: Science Press) p372 (in Chinese) [刘云圻 2011 有机纳米与分子器件 (北京: 科学出版社) 第 372 页]
- [12] Han L, Koide N, Chiba Y, Mitate T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2433
- [13] Ito S, Nazeeruddin M K, Liska P, Comte P, Charvet R, Péchy P, Jirousek M, Kay A, Zakeeruddin S M, Grätzel 2006 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **14** 589
- [14] Arakawa H, Yamaguchi T, Sutou T, Koishi Y, Tobe N, Matsumoto D, Nagai T 2010 *Curr. Appl. Phys.* **10** 157
- [15] Fukui A, Fuke N, Komiya R, Koide N, Yamanaka R, Katayama H, Han L 2009 *Appl. Phys. Express* **2** 082202

Study of influencing factors for performance of large-scale dye-sensitized solar cells based on the semi-empirical model*

Wu Bao-Shan Wang Lin-Lin Wang Yong-Mei Ma Ting-Li[†]

(State Key Laboratory of Fine Chemicals, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 27 May 2011; revised manuscript received 7 July 2011)

Abstract

Based on some physical and geometric parameters, the influence of internal resistance on the cell performance is analyzed and a semi-empirical mathematical model of the efficiency is built for some configurations of large-scale dye-sensitized solar cells. Three configurations of large-scale cells are investigated, in which the independent units are connected in series and in parallel, as well as in series-parallel. The efficiencies of the three-type large-scale cells are calculated according to their physical and geometric parameters. The applicability of the model is analyzed by comparing the calculated efficiencies with the measured ones. The influences of the physical and geometric parameters on the cell performance are investigated based on the semi-empirical mathematical model. It is found that the optimization of the performance of large-scale cells can be carried by analyzing the influences of physical and geometric parameters using the semi-empirical mathematical model.

Keywords: dye-sensitized, solar cell, large-scale, semi-empirical model

PACS: 88.40.jr, 73.63.Bd, 73.50.Pz, 88.10.gc

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50773008), and National High Technology Research and Development Program for Advanced Materials of China (Grant No. 2009AA03Z220).

[†] E-mail: tinglima@dlut.edu.cn