大面积全柔性染料敏化太阳能电池光电性能优化

林 逍 武明星 安 江 苗青青 覃 达 马廷丽*

(大连理工大学化工学院精细化工国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 设计并制作了大面积高效全柔性染料敏化太阳能电池(DSCs). 通过引入光散射层或施加机械压力, DSCs 的光电转化效率有了大幅度提高. 实验室小面积(0.4 cm×0.4 cm)柔性 DSCs 的光电转化效率达到 5.50%. 大面积(2 cm×3 cm, 活性面积为 2.7 cm²) DSCs 的光电转化效率从未进行处理的 1.52% 上升到 1.81% 和 2.50%, 分别提高了 20.0% 和 66.7%. 5 cm×7 cm 面积的 DSCs (活性面积为 16.2 cm²) 的光电转化效率在未做任何优化处理的条件下达到了 1.60% (光强 40 mW·cm⁻²). 同时, 本文对提高光电转化效率的机理进行了深入研究. 电化学阻抗测试结果表明, 加压法能明显减小电池的内部串联电阻(R_s)及 TiO₂/染料/电解液界面间的电荷电阻(R_{ct}). 扫描电镜结果也显示加压后 TiO₂ 粒子之间粘结更加紧密, 更利于电子在 TiO₂ 薄膜中的传输及染料的吸附. 另外, 900 h 的长期稳定性实验结果表明, 制作的柔性 DSCs 的各项光电性能参数均无明显下降. 该实验结果为柔性染料敏化太阳能电池的基础研究和大面积产业化技术研究奠定了基础.

关键词: 全柔性; 太阳能电池; 散射层; 加压法; 稳定性

中图分类号: O644

Optimization of the Photoelectric Performance of Large-Scale All-Flexible Dye-Sensitized Solar Cells

LIN Xiao WU Ming-Xing AN Jiang MIAO Qing-Qing QIN Da MA Ting-Li*

(State Key Laboratory of Fine Chemicals, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, P. R. China)

Abstract: Highly efficient large scale flexible dye-sensitized solar cells (DSCs) were successfully designed and fabricated. By the introduction of a light scattering layer or pressure, the DSC efficiency was greatly improved. The flexible DSCs with a small surface area (0.4 cm × 0.4 cm) gave a high energy conversion efficiency of 5.50%. The energy conversion efficiencies of large area DSCs (2 cm × 3 cm, active area of 2.7 cm²) improved from 1.52% to 1.81% and 2.50%, which is an increase of 20.0% and 66.7% compared with the DSCs prepared without any treatment. The 5 cm × 7 cm DSCs (active area of 16.2 cm²) without any optimization showed an energy conversion efficiency of 1.60% under a sunlight intensity of 40 mW · cm⁻². The mechanism for the improvement in efficiency was also studied. The results of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) demonstrated that the pressure method can significantly reduce the series resistance (R_s) and the charge transfer resistance (R_{ct}) in the TiO₂/dye/electrolyte interface. Scanning electron microscopy (SEM) showed that the TiO₂ particles were far more closely connected after pressing, which was helpful for electron transport in the TiO₂ network as well as for dye adsorption. In addition, the photovoltaic parameters of these flexible DSCs were found to be stable after the 900 h stability tests. The experimental results obtained for these flexible DSCs can be used as a foundation for further basic research and for industrialization technical research.

Received: July 4, 2011; Revised: August 26, 2011; Published on Web: September 2, 2011.

* Corresponding author. Email: tinglima@dlut.edu.cn; Tel: +86-411-84986237.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (50773008) and National High Technology Research and Development Program of China (863) (2009AA03Z220).

国家自然科学基金(50773008)及国家高技术研究发展计划(863) (2009AA03Z220)资助项目

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

Key Words: All-flexibility; Solar cell; Scattering layer; Pressure method; Stability

1 引言

自1991年染料敏化太阳能电池(DSCs)被首次报道以来,¹由于其制作工艺简单、成本低、无污染、具有较高的光电转化效率等优点引起广泛关注.²⁻⁵ DSCs通常是由吸附染料的纳米多孔TiO₂薄膜、带有Pt的对电极以及含有I₃⁻/I⁻氧化还原电对的电解液所组成.传统的刚性DSCs以镀有铟锡金属氧化物(ITO)导电层的玻璃为电极基板,存在着易碎、质重、可塑性差、不易加工等缺点.2000年,Pichot研究组⁶发表了以高分子导电膜为基底的柔性DSCs.这一类型的DSCs具备了质轻,可弯曲,抗冲击能力强,可塑性好等优点,成为目前国内外研究的新热点.⁷⁻¹⁰但是以带有导电膜的高分子聚苯二甲酸乙二醇酯(ITO/PET)或聚萘二甲酸乙二醇酯(ITO/PEN)为基底的柔性DSCs,由于基底最高只能承受150 °C,不能像刚性DSCs那样通过高温焙烧TiO₂浆料制备多孔高效的光阳极薄膜,从而大大降低了柔性DSCs的光电转化效率.近年来很多研究小组开展了低温制膜的研究.其中Iwasaki研究组¹¹研究了不含有机粘结剂的TiO₂浆料来低温制备阳极薄膜,但该法制备的柔性小面积DSCs的光电转化效率仅为2.6%,Hagfeldt等¹²对柔性基底上的TiO₂薄膜施加压力,研究不同压力下电池各项光电参数的变化,并在最优条件下电池取得了3.0%的光电转化效率.清华大学林红研究组¹³通过研究TiO₂浆料的配方,优化柔性DSCs的制作工艺,使光电转化效率达到了4.05%.但总体来说低温制备的光阳极构建的电池光电转化效率还不高.

本课题组¹⁴自2002年开展柔性DSCs的研究,开发了基于不锈钢板、镍板、铜板、铝板、聚酯薄膜和导电塑料基板的6种柔性DSCs对电极.最近我们又开发了一种简便的膜转移技术高温制备柔性光阳极膜,即在平滑的基板表面制备膜电极,高温烧结得到多孔的TiO₂膜,通过简单的物理摩擦法将高导电性的多孔膜转移到柔性基底上,然后施加一定压力,取得了目前基于高分子导电膜基底的全柔性DSCs的最高光电转化效率(5.7%).¹⁵为了满足柔性DSCs产业化的需求,众多研究者积极开展高效大面积柔性电池的研究.但是迄今为止世界上关于大面积柔性DSCs的报道还很少,特别是关于柔性DSCs

的长期稳定性研究.

本文设计利用我们独自开发的喷涂法构建2 cm×3 cm和5 cm×7 cm大面积全柔性DSCs.讨论散射层、加压法及光照强度对DSCs光电性能的影响,以期得到大幅度提高大面积全柔性DSCs的光电转化效率的最优制作方法.同时跟踪分析了电池的各项性能参数的稳定性.

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

所用试剂为TiO₂纳米粉体(P25,粒径25 nm,70%锐钛矿相+30%金红石相, Degussa, 德国)、TiO₂大粒子(ST41,粒径160 nm, ISK, 日本)、钛酸四丁酯(TBT,分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司)、硼氢化钠(分析纯,上海国药集团)、氯铂酸(分析纯,大连辽东化学试剂公司)、钌染料(N719,大连七色光)、异丙醇(分析纯,天津博迪化工股份有限公司)、低温银浆料(BY9700,上海宝银有限公司).

基底材料是铟掺杂的氧化锡/聚萘二甲酸乙二醇酯(ITO/PEN, Peccell 公司, 日本);利用全方位行星式球磨机(QM-QX04, 南京大学仪器厂)球磨TiO₂浆料;实验室小型热压机(R3201, 武汉启恩科技有限公司)用来对光阳极材料施加压力;利用粗糙度检测仪(SNRFCOM130A, 东京精密, 日本)测定薄膜厚度;利用电化学工作站(ZAHNER ZENNIUM, 德国Zahner 公司)研究电池内阻变化;太阳光模拟器(1 sun, 光强100 mW·cm⁻², AM1.5, Oriel, 美国)和数字源(Keithley-2601, 美国)用来测定柔性DSCs的光电性能;TiO₂薄膜的表面形貌由扫描电镜表征(Hitachi, S4800).

2.2 柔性TiO₂光阳极膜的制备

浆料的制备.取4 g P25或ST41粉体与适量TBT及异丙醇、一定量锆珠,混合球磨4 h.普通低温TiO₂薄膜(A)的制备,首先将ITO/PEN基板边缘用胶带保护,保留两块对称的0.9 cm×1.5 cm面积的空白,将P25浆料均匀喷涂到基板空白处,120 °C干燥2 h,降至室温.然后揭掉胶带,在薄膜边缘处印刷低温银浆料制备银栅电极,120 °C干燥30 min.加散射层TiO₂薄膜(B)的制备是先喷涂适量的P25浆料后再喷涂少量的ST41大粒子浆料;喷涂一定量P25浆

料成膜后用实验室小型热压机在 40 °C, 60 MPa 下加压 1 min, 得到加压后 TiO₂膜(C), 其它实验步骤与薄膜 A 的制备相同. 粗糙度检测仪测得三种光阳极膜厚为(12±1) μm.

2.3 柔性 Pt 对电极的制备

化学还原方法制备 Pt 对电极,¹⁶ 将 0.5% (w) 的氯铂酸异丙醇溶液喷涂到 ITO/PEN 基板上, 120 °C 干燥 1 h, 冷至室温, 取出后快速浸入 30 mmol·L⁻¹ NaBH₄ 的水/乙醇溶液, 反应约 3 min 取出, 依次用去离子水、无水乙醇冲洗, 吹干, 最后 120 °C 烘干 1 h. 印刷银栅电极, 得到对电极.

2.4 全柔性 DSCs 的组装及光电性能测试

将 TiO₂ 薄膜浸泡于 5×10⁻⁴ mol·L⁻¹ 的 N719 的乙醇溶液中 16 h, 制成光阳极. 将光阳极与对电极采用三明治结构组装, 夹层为热熔 surlyn 膜, 然后灌注电解液, 电解液由 1.0 mol·L⁻¹ 1-甲基-3-丙基咪唑碘(PMII)、0.15 mol·L⁻¹ 碘单质(I₂)、0.1 mol·L⁻¹ GuSCN、0.5 mol·L⁻¹ 叔丁基吡啶(TBP)及 3-甲氧基丙腈(MPN)组成. 最后, 紫外胶固化封装. 对制作的 DSCs 在 AM1.5, 光照强度为 100 mW·cm⁻² 的模拟太阳光照射下, 利用 Keithly 数字源表进行光电性能测试, 得出光电流密度-光电压($J-V$)关系曲线, 并测试其在 900 h 内的光电性能变化, 测试条件为自然光照射, 测试时间为 2011 年 3-4 月, 地点为中国大连. 另外, 利用电化学工作站在暗态下, 施加 -0.7 V 的偏压测试电池内阻变化, 得到电化学阻抗谱图(EIS).

3 结果与讨论

3.1 电池的光电性能

利用简单机械加压法制备的小面积(0.4 cm×0.4 cm)柔性 DSCs 的光电转化效率(η)高达 5.50%, 其中开路电压(V_{oc}): 780 mV, 短路电流密度(J_{sc}): 10.81 mA·cm⁻², 填充因子(FF): 0.65. 我们把实验用的 DSCs 面积从 0.16 cm² 扩大到 2.7 cm². 图 1 为不同方法处理后的光阳极组成 DSCs 的 $J-V$ 曲线, 光阳极 A、B、C 组成的 DSCs 光电转化效率分别为

图1 不同方法处理的光阳极组装的 DSCs 光电流密度-光电压($J-V$)曲线

Fig.1 Photocurrent density-photovoltage ($J-V$) curves of the DSCs based on photoanodes treated with different methods

(A) normal, (B) with scatter layer, (C) with pressure

1.52%, 1.81%, 2.50%, 具体数值如表 1. 明显看出, 大面积 DSCs 光电转换效率明显小于小面积 DSCs, 这主要归因于面积放大时基板电阻增大, 电子收集效率降低, 电流密度减小.¹⁷ 与不经任何处理的光阳极 A 相比, 加散射层可以使电池的光电转化效率提高 20.0%, 加压法使光电转化效率提高 66.7%. 无论对光阳极进行散射层处理还是加压处理, 电池的 V_{oc} 变化不大. 散射层的引入使光电转化效率增大的原因被认为是当光入射到半导体薄膜上遇到大粒子时, 光在粒子表面向各个方向发生散射, 增加了光在半导体薄膜中的传播路程, 使吸附在薄膜上的染料对未被充分利用的光进行二次利用, 从而提高了染料分子光捕获效率, 特别是提高了染料分子对长波区光的吸收效率, 增加了光电流的输出,¹⁸⁻²⁰ 正如表 1 数据所示, J_{sc} 由 3.57 mA·cm⁻² 增加到 4.81 mA·cm⁻². 但是散射层的引入在一定程度上使薄膜的表面孔径减小, 限制了电解质的扩散, 使 FF 从 0.60 下降至 0.54. 另一方面, 加压使 TiO₂ 粒子之间以及 TiO₂ 粒子与基底材料之间结合得更加紧密, 这就使相同膜厚条件下 TiO₂ 粒子数增加, 有利于吸附更多的染料, 从而使光生载流子注入增多, 进而增加光电流, 这

表 1 不同光阳极组装的 DSCs 光电性能与电化学阻抗参数

Table 1 Photovoltaic and EIS parameters of the DSCs based on different photoanodes

Photoanode	V_{oc}/mV	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF	$\eta/\%$	R_s/Ω	R_{ct}^1/Ω	R_{ct}^2/Ω
A	711	3.57	0.60	1.52	6.67	0.44	4.57
B	704	4.81	0.54	1.81	6.31	0.78	6.20
C	705	5.22	0.68	2.50	5.89	0.82	2.84

V_{oc} : open circuit voltage, J_{sc} : short circuit current density, FF: fill factor, η : energy conversion efficiency, R_s : series resistance,

R_{ct}^1 : charge transfer resistance in Pt/electrolyte interface, R_{ct}^2 : charge transfer resistance in the interface of TiO₂/dye/electrolyte

与 $J-V$ 测试结果一致, 加压使 J_{sc} 由 $3.57 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加至 $5.22 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 提高了46.2%. 同时由于加压后 TiO_2 粒子之间以及 TiO_2 粒子与基底材料之间的结合更加紧密, 电子传递更加通畅, 电池内部电阻减小,²¹ 从而使FF从0.60上升至0.68, 提高了13.3%. 电流密度提高与填充因子增加的共同作用使光电转化效率从1.52%增加到2.50%, 光电转化效率得到66.7%的大幅度提高.

为了分析散射层及机械加压对 TiO_2 光阳极的影响, 我们对用不同方法处理的 TiO_2 电极(A、B、C)组装的DSCs进行了电化学阻抗(EIS)测试. 图2是典型的Nyquist阻抗图, 插图是DSCs的等效电路图,^{22,23} 其中 R_s 代表整个回路的串联电阻(series resistance), R_{ct}^1 表示Pt/电解液界面间的传荷电阻, CPE^1 代表相应的电容. R_{ct}^2 表示 TiO_2 /染料/电解液界面间的传荷电阻, CPE^2 代表相应的电容, Z_N 为电解液中的氧化还原电对(I_3^-/I^-)的能斯特扩散电阻. 这里我们主要考察光阳极材料对电池性能的影响, 即主要考察 R_s 与 R_{ct}^2 的变化. 表1中, 加散射层后, R_s 从 6.67Ω 下降到 6.31Ω , R_{ct}^2 则从 4.57Ω 增加到 6.20Ω , 主要是因为散射层大粒径 TiO_2 粒子堆积的薄膜, 大粒子的 TiO_2 一定程度上阻碍了 I_3^-/I^- 在阳极薄膜扩散及渗透. 但大粒径 TiO_2 粒子容易产生光漫反射提高光的利用率, 电池光电转化效率从1.52%上升至1.81%是光的充分利用及电池内部电阻变化共同作用的结果. 另一方面, 从图3的SEM图中可看出加压后整个薄膜变得更加致密, TiO_2 粒子间粘结得更加牢固. 这表明加压后电子在 TiO_2 粒子间及 TiO_2 粒子与

图2 不同光阳极组装的DSCs电化学阻抗谱

Fig.2 Electrochemical impedance spectra (Nyquist) of the DSCs based on different photoanodes

(A) normal, (B) with scatter layer, (C) with pressure; The inset is the equivalent circuit diagram of the DSCs. CPE^1 : the capacitance in the interface of Pt/electrolyte; CPE^2 : the capacitance in the interface of TiO_2 /dye/electrolyte, Z_N : Nernst diffusion impedance

图3 加压前(A)后(B) TiO_2 薄膜扫描电镜图

Fig.3 SEM images of the TiO_2 films before (A) and after (B) pressure

ITO-PEN 导电基板间传递更快, 使 TiO_2 导带中的电子更容易到达ITO-PEN 导电基板, 减少了电子的复合几率.²⁴ 加压后 R_s 从 6.67Ω 下降至 5.89Ω , R_{ct}^2 从 4.57Ω 下降至 2.84Ω .

3.2 电池的稳定性

电池的稳定性是制约DSCs产业化的主要因素之一, 因此我们进行了长达900 h的稳定性实验. 如图4所示, 光电流密度先降低后升高, 一周后稳定在 $5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; 电压在690–730 mV之间变化, 经过900 h, 没有明显衰减; 填充因子在第一周内持续增

图4 DSCs稳定性实验光电性能参数

Fig.4 Photovoltaic parameters of the DSCs in the stability tests

加,这是由于较大的电池面积导致电解液的扩散需要一定的时间,待电解液充分扩散后,填充因子达到最大值,维持在0.57左右.电池的光电转化效率持续增加,288 h后增加至最大值2.1%,最后稳定在2.0%左右.以上研究结果表明制备的柔性DSCs具有很好的稳定性,这一结果与目前Miyasaka组²⁵报道的可保持220 h内光电性能不变的结果相比得到了大幅改善.

3.3 电池面积的再扩大及光照强度对电池光电性能的影响

柔性DSCs的最大特点就是可塑性强,特别适合在室内低光照条件下使用.众所周知,硅电池在低光强下光电转化效率急剧下降,而DSCs则恰恰相反,低光照条件下其光电转化效率有明显提高.由于活性面积为 2.7 cm^2 的DSCs输出功率为6.8 mW,还不能满足日常需要,所以我们进一步把DSCs面积扩大6倍至 16.2 cm^2 .图5所示的是活性面积为 16.2 cm^2 的DSC在不同光强下的 $J-V$ 曲线.在标准条件下(1 sun, 光强 $100\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$),电池光电性能参数为 $V_{oc}=640\text{ mV}$, $J_{sc}=3.30\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $FF=0.53$, $\eta=1.12\%$;在0.8 sun条件下, $V_{oc}=660\text{ mV}$, $J_{sc}=2.76\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $FF=0.55$, $\eta=1.25\%$;在0.6 sun条件下, $V_{oc}=670\text{ mV}$, $J_{sc}=2.26\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $FF=0.57$, $\eta=1.44\%$;在0.4 sun条件下, $V_{oc}=650\text{ mV}$, $J_{sc}=1.59\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $FF=0.62$, $\eta=1.60\%$.以上数据表明:光照强度的减小导致电池电流密度降低,而填充因子和光电转化效率则逐渐增大.由于DSCs光电转化效率指的是在外部回路上连接最佳负荷阻抗时得到的最大功率(P_{max})与入射光强(P_m)之比.²⁶所以,在低光强下,DSCs的光电转化效率增加,这也是DSCs相比传统硅电池

的最重要的优势之一.

4 结 论

综上所述,我们成功地制备了全柔性大面积DSCs,有效面积为 2.7 cm^2 的DSCs光电转化效率达到了2.50%.有效面积为 16.2 cm^2 的DSCs,光电转化效率达到1.60%. $J-V$ 及EIS测试结果表明,引入散射层增加光的利用率,使光电转化效率提高了20%,加压法解决了低温制备 TiO_2 粒子与粒子之间及粒子与基底之间粘结不好导电性低的弊端,使电池的光电转化效率大幅度提高了66.7%.长期稳定性实验结果表明,制作的柔性DSCs在900 h后未发生光电性能的降低.总之,这些研究结果为柔性染料敏化太阳能电池的基础研究和大面积产业化技术应用研究奠定了基础.

References

- (1) O'Regan, B.; Grätzel, M. *Nature* **1991**, *353*, 737.
- (2) Grätzel, M. *Nature* **2001**, *414*, 338.
- (3) Tao, L.; Yang, Y. Z.; Shi, C. W.; Wu, Y. C.; Wu, X. Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2010**, *26*, 578. [桃李, 杨燕珍, 史成武, 吴玉程, 吴小燕. 物理化学学报, **2010**, *26*, 578.]
- (4) Li, B.; Cheng, P.; Deng, C. S. *Chin. J. Chem.* **2007**, *20*, 816.
- (5) Hagfeldt, A.; Boschloo, G.; Sun, L. C.; Kloo, L.; Pettersson, H. *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 6595.
- (6) Pichot, F.; Pitts, J. R.; Gregg, B. A. *Langmuir* **2000**, *16*, 5626.
- (7) Chen, D. H.; Huang, F. Z.; Cheng, Y. B.; Caruso, R. A. *Adv. Mater.* **2009**, *21*, 2206.
- (8) Wang, Y.; Wu, J. H.; Fan, L. Q.; Lan, Z.; Xiao, Y. M.; Li, Q. H.; Huang, M. L. *Mater. Rev.* **2010**, *24*, 131. [王岳, 吴季怀, 范乐庆, 兰章, 肖尧明, 李清华, 黄妙良. 材料导报, **2010**, *24*, 131.]
- (9) Wang, M. K.; Anghel, A. M.; Marsan, B.; Ha, N. C.; Pootrakulchote, N.; Zakeeruddin, S. M.; Grätzel, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 15976.
- (10) Yang, L.; Xin, G.; Wu, L. Q.; Ma, T. L. *Prog. Chem.* **2009**, *21*, 2242. [杨丽, 辛刚, 吴丽琼, 马廷丽. 化学进展, **2009**, *21*, 2242.]
- (11) Iwasaki, M.; Lee, C. W.; Kim, T. H.; Park, W. K. *J. Ceram. Soc. Jpn.* **2008**, *116*, 153.
- (12) Lindström, H.; Holmberg, A.; Magnusson, E.; Lindquist, S. E.; Malmqvist, L.; Hagfeldt, A. *Nano Lett.* **2001**, *1*, 97.
- (13) Lin, H.; Li, X.; Liu, Y. Z.; Li, J. B. *Mater. Sci. Eng. B* **2009**, *161*, 2.
- (14) Ma, T. L.; Fang, X. M.; Akiyama, M.; Inoue, K.; Nomam, H.; Abe, E. *J. Electroanal. Chem.* **2004**, *574*, 77.
- (15) Yang, L.; Wu, L. Q.; Wu, M. X.; Xin, G.; Lin, H.; Ma, T. L. *Electrochem. Commun.* **2010**, *12*, 1000.

图5 16.2 cm^2 面积DSC在不同光照强度下 $J-V$ 曲线
Fig.5 $J-V$ curves of the DSC with an active area of 16.2 cm^2 under different light intensities

The inset is the photograph of the larger scaled DSC.

- (16) Papageorgiou, N.; Maier, W. F.; Grätzel, M. *J. Electrochem. Soc.* **1997**, *144*, 876.
- (17) Han, L.; Koide, N.; Chiba, Y.; Islam, A.; Komiya, R.; Fuke, N.; Fukui, A.; Yamanaka, R. *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *86*, 21350.
- (18) Usami, A. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2000**, *64*, 73.
- (19) Huang, F. Z.; Chen, D. H.; Zhang, X. L.; Caruso, R. A.; Cheng, Y. B. *Adv. Funct. Mater.* **2010**, *20*, 1301.
- (20) Liu, J.; Yang, H. T.; Zhang, J. B.; Zhou, X. W.; Lin, Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2011**, *27*, 408. [刘 佳, 杨浩田, 张敬波, 周晓文, 林 原. 物理化学学报, **2011**, *27*, 408.]
- (21) Koide, N.; Islam, A.; Chiba, Y.; Han, L. Y. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **2006**, *182*, 296.
- (22) Kern, R.; Sastrawan, R.; Ferber, J.; Stangl, R.; Luther, J. *Electrochim. Acta* **2002**, *47*, 4213.
- (23) Wang, Q.; Moser, J. E.; Grätzel, M. *J. Phys. Chem. B* **2005**, *109*, 14945.
- (24) Green, A. N. M.; Palomares, E.; Haque, S. A.; Kroon, J. M.; Durrant, J. R. *J. Phys. Chem. B* **2005**, *109*, 12525.
- (25) Ikegami, M.; Suzuki, J.; Teshima, K.; Kawayara, M.; Miyasaka, T. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2009**, *93*, 836.
- (26) Trupke, T.; Würfel, P.; Uhlendorf, I. *J. Phys. Chem. B* **2000**, *104*, 11484.

欢迎订阅《物理化学学报》

2012年全国报刊杂志征订工作已经开始, 敬请向贵单位推荐订阅2012年《物理化学学报》。

《物理化学学报》是由中国科协主管, 中国化学会主办, 北京大学化学与分子工程学院承办的基础学科类学术刊物。《物理化学学报》设有“通讯”、“研究论文”和“综述”等栏目, 报导物理化学学科及交叉学科的基础研究及应用基础研究所取得的创新成果。

中国科学院院士唐有祺先生担任主编; 编委会中有15位中国科学院院士, 12位海外学者。2004年, 《物理化学学报》获得国内期刊界最高奖——第三届全国期刊奖百种重点期刊奖。国家自然科学基金委重点学术期刊和中国科协精品科技期刊工程项目资助出版。读者普遍认为《物理化学学报》具有极高的学术价值和收藏价值。

《物理化学学报》已被美国《科学引文索引》(SCI)网络版、美国《化学文献》(CA)、日本《科技文献速报》、俄罗斯《文献杂志》(AJ)、中国科协和国家自然科学基金委主办的《中国学术期刊文摘》、中国科学技术部万方数据网络中心的《中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)》、中国科学院文献情报中心的《中国科学引文数据库》、中国生物学文献数据中心的《中国生物文摘》等国内外多种著名检索刊物和文献数据库摘引和收录。

《物理化学学报》现为月刊, 大16开本, 232页, 亚光铜版纸印刷。2012年订价35.00元/册, 全年订价420.00元。国内邮发代号82-163, 欢迎国内读者到当地邮局订阅, 国外读者可通过中国国际图书贸易总公司订阅(Code No 1443-MO)。若通过邮局订阅有困难或错过订阅, 请直接与编辑部联系。

欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆订阅。

通讯地址: 北京大学化学楼C206《物理化学学报》编辑部

邮 编: 100871

服务热线: +86-10-62751724 传真: +86-10-62756388

E-mail: whxb@pku.edu.cn 网址: <http://www.whxb.pku.edu.cn/>

《物理化学学报》编辑部