

文章编号 1004-924X(2013)08-2016-07

CoAl₂O₄ 粉体制备及在染料敏化太阳电池中的应用

胡志强^{1,2*}, 秦颖¹, 姜妍彦¹, 郝洪顺¹, 高宏²

(1. 大连工业大学, 新能源材料研究所, 辽宁 大连 116034;

2. 大连交通大学, 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要:采用向太阳电池光阳极中复合窄禁带半导体材料的方法来提高光阳极的光响应范围,以改善染料敏化太阳能电池的性能。用柠檬酸凝胶法制备 CoAl₂O₄ 纳米粉体,并通过 X-射线衍射光谱分析煅烧温度对 CoAl₂O₄ 纳米粉体晶型及晶粒的影响规律;采用透射电镜观察 CoAl₂O₄ 纳米粉体的表面形貌;通过紫外-可见吸收光谱分析 CoAl₂O₄ 纳米粉体和 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合多孔纳米薄膜的吸光度,并计算了 CoAl₂O₄ 纳米粉体的禁带宽度。以 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜为光阳极制备了染料敏化太阳电池(DSSC),应用太阳光模拟器及数字源表测试了 DSSC 的光电性能,分析了 CoAl₂O₄ 的复合量对 DSSC 光电性能的影响规律。实验结果表明:CoAl₂O₄ 粉体的最佳烧结温度为 700 °C;CoAl₂O₄ 粉体的禁带宽度为 1.69 eV,属于窄禁带半导体材料;当 CoAl₂O₄ 的复合量为 1%时,电池性能较好,转化效率提高了 62%。另外,CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池的稳定性比纯 TiO₂ 薄膜电池好。得到的结果说明向 TiO₂ 中复合 CoAl₂O₄ 粉体可以提高电池的转化效率。

关键词:CoAl₂O₄;粉体制备;溶胶凝胶法;染料敏化太阳电池;光电转换效率

中图分类号:TB321;TM914.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132108.2016

Preparation of spinel CoAl₂O₄ nanopowders and their applications to DSSC

HU Zhi-qiang^{1,2*}, QIN Ying¹, JIANG Yan-yan¹, HAO Hong-shun¹, GAO Hong²

(1. *Institute of New Energy Material, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;*

2. *School of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116034, China)*

** Corresponding author, E-mail: hzq@dlpu.edu.cn*

Abstract: Narrow band gap semiconductor materials were composited to a photoanode to improve its light response characteristics and the photoelectric conversion properties of dye-sensitized solar cells (DSSCs). The citric acid gel method was used to prepare the CoAl₂O₄ nanopowders and the X-ray diffraction spectra were utilized to analyze the effect of roasting temperature on crystal structures and particle sizes. Then, the surface morphology of CoAl₂O₄ was observed by transmission electron microscopy, the absorbances of CoAl₂O₄ nanopowders and CoAl₂O₄/TiO₂ porous composite films were tested by UV-visible absorption spectroscopy and the band gaps of CoAl₂O₄ nanopowders were calculated. By using CoAl₂O₄/TiO₂ composite films as the photoanode, the DSSC was prepared. The optical performance of the DSSC was tested by a solar simulator and a SourceMeter and the influence of doping CoAl₂O₄ on the photoelectric properties of a DSSC was investigated. The results show that the

收稿日期:2013-02-12;修订日期:2013-03-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA05Z417);大连市科技平台资助项目(No. 2010-354)

optimum roasting temperature of CoAl₂O₄ powders is 700 °C; and its band gap energy is 1.69 eV, which means that it is a narrow band gap semiconductor material. Moreover, the performance of DSSC is the best and the conversion efficiency improves by 62% when the amount of CoAl₂O₄ powder is 1% (weight percentage). The stability of the CoAl₂O₄/TiO₂ composite thin film cells is better than that of the pure TiO₂ thin film cell. These results demonstrate that compositing CoAl₂O₄ to TiO₂ can improve the conversion efficiencies of DSSCs.

Key words: CoAl₂O₄; nanopowder preparation; Sol gel method; Dye-sensitized solar cell (DSSC); photoelectric conversion efficiency

1 引言

染料敏化太阳能电池 (Dye-sensitized Solar Cell, DSSC) 因其制作工艺简单, 成本低, 原料环保等优点广受学者关注^[1-2]。DSSC 是以吸附了染料的 TiO₂ 多孔薄膜作为光阳极, 铂电极为对电极, 在两电极之间注入适量的电解质而形成的电池^[3-4]。其中 TiO₂ 光阳极对电池整体性能有很大影响。TiO₂ 的禁带宽度为 3.2 eV, 只能吸收紫外区域的光, 本身对太阳光的利用率低。另外, TiO₂ 薄膜中还存在大量的表面态, 这些表面态构成陷阱, 束缚电子在薄膜中运输, 因此电子的运输时间会增加, 暗电流会增加, 导致电池的转换效率降低^[5]。为了提高光电转化效率, 对 TiO₂ 光阳极进行改性研究是重要的课题之一。学者们尝试各种方法来改善 TiO₂ 阳极的性能, 如 TiCl₄ 表面处理, 表面包覆、复合其他半导体化合物等。DAI S Y 研究小组^[6]采用适当浓度的 TiCl₄ 溶液处理 TiO₂ 颗粒, 使电池的开路电压和短路电流上升。HUANG C H^[7] 在 TiO₂ 表面包覆了 ZnO, 由于核-壳之间的势垒减小了电荷复合, 增大了 TiO₂ 导电的电子密度, 提高了开路电压和电池效率。在 TiO₂ 薄膜复合一定的其他半导体化合物薄膜, 如 CdS、ZnO、PbS 等, 复合薄膜的形成能改变 TiO₂ 膜中的电子分布, 抑制载流子在传导过程中的复合, 提高电子的传输速率^[8]。一些窄禁带半导体材料能够较好地吸收可见光谱, 与 TiO₂ 复合制成光阳极改善其对太阳光的响应范围, 可提高太阳能转换效率^[9-10]。

尖晶石型材料种类繁多, 应用广泛, 其中部分为窄带隙半导体, 在光诱导下具有光、电、磁及催化等特性, 而且尖晶石材料的制备简单, 原料易得。目前, 向 TiO₂ 中复合尖晶石粉体, 改性 TiO₂

光阳极, 拓展太阳光响应范围, 提高电池性能这方面的研究还鲜见报道。本文作者研究小组做了这方面的工作, 尝试合成 CoAl₂O₄ 尖晶石型纳米粉体并与 TiO₂ 复合制备染料敏化太阳能电池光阳极, 利用 CoAl₂O₄ 尖晶石禁带宽度较小的特征^[11-12], 提高光阳极的光响应, 以提高电池性能。采用柠檬酸法制备出 CoAl₂O₄ 纳米粉体, 对其晶型、表面形貌、禁带宽度进行表征, 并将其复合到 TiO₂ 中制备成光阳极, 组装染料敏化太阳能电池。对其光电性能进行了测试, 结果显示电池的转化效率得到了提高。

2 实验

2.1 实验药品与仪器

2.1.1 实验药品

实验用药品主要有: Co(NO₃)₃ · 6H₂O (分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司); Al(NO₃)₃ · 9H₂O (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 柠檬酸 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 氨水 (分析纯, 天津市凯信化学工业有限公司); P25 (二氧化钛纳米粉, degussa, 德国); 无水乙醇 (分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司)。

2.1.2 实验仪器

采用 XRD (日本理学 D/max-3B 型) 分析样品的物相, 透射电子显微镜 (日本 JEOL2100F) 观察 CoCr₂O₄ 粉体和 TiO₂ 粉体的形貌。用 UV-vis (美国 PerkinElmer Lambda35) 分析样品的紫外-可见吸收光谱; 太阳光模拟器 (美国 SS50A (AM1.5, 100 mW/cm²) 型) 和吉时利数字源表 (美国 Keithley2400) 测试电池的 I-V 曲线, 分析电池的光电性能。

2.2 CoAl₂O₄ 粉体的制备

Co(NO₃)₃ · 6H₂O 与 Al(NO₃)₃ · 9H₂O 的

物质的量之比为 1 : 2 形成溶液 A, 柠檬酸的物质的量与 A 溶液中阳离子总数之比为 2 : 1 形成 B 溶液, 将 B 溶液缓慢滴加到 A 溶液中, 在 50 °C 下搅拌 30 min, 用氨水调节溶液的 pH 值至 6.5, 温度升至 75 °C, 继续搅拌, 直至形成凝胶, 将凝胶在 80 °C 下干燥成干凝胶, 然后在不同温度下煅烧, 得到 CoAl_2O_4 粉体。

2.3 $\text{CoAl}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ 复合光阳极的制备及电池组装

将制得的 CoAl_2O_4 粉体以 TiO_2 质量的 0%、1%、2%、3% 复合到 TiO_2 粉体中, 加入一定量的冰乙酸、OP 乳化剂和去离子水, 球磨 1~3 h 后, 静置 30 min。然后采用丝网印刷法将浆料涂覆到 FTO 导电玻璃上, 干燥 30 min 后, 放入马弗炉中以 10 °C/min 升温至 500 °C 并保温 30 min, 冷却后取出。将取出的阳极放入 N719 染料中浸泡 12 h, 取出后用无水乙醇清洗阳极表面, 然后干燥。以铂电极为对电极, 将上述制备的光阳极与对电极进行组装, 利用虹吸原理在两电极之间注入适量的电解质, 组装成染料敏化太阳电池。在标准为 AM1.5, 100 mW/cm² 太阳光模拟器下测定电池的光电性能。

3 结果与讨论

3.1 合成 CoAl_2O_4 粉体的 XRD 分析

图 1 是不同煅烧温度下 CoAl_2O_4 纳米粉体的 XRD 曲线。由图中可以看出, 当温度为 400 °C 时, 已经开始形成尖晶石晶体, 但此时的衍射峰较宽, 强度也较弱, 说明晶体晶粒还比较小, 结晶还不完全。随着温度的升高, 晶粒逐渐变大, 衍射峰强度变大, 峰也比较尖锐, 说明结晶程度逐渐完

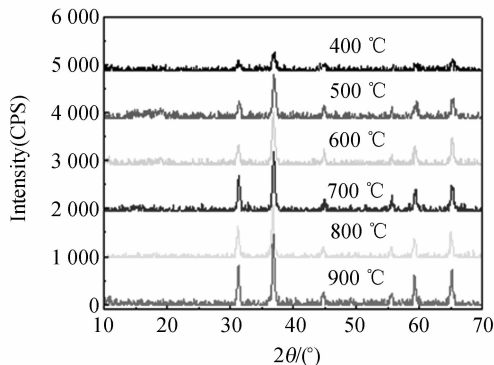


图 1 不同温度下 CoAl_2O_4 纳米粉体 XRD 曲线
Fig. 1 XRD patterns of CoAl_2O_4 nano-powders prepared in different sintering temperatures

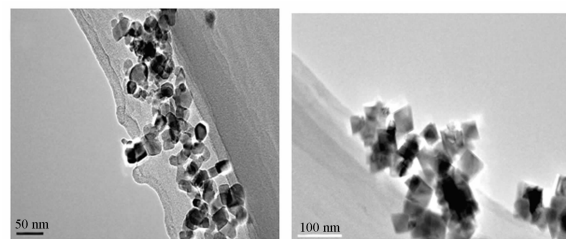
全。当温度为 700 °C 时, 各个衍射峰的位置与标准卡片 (38-0814) 一致, 说明制备的粉体尖晶石晶体生成良好, 晶型纯度较高, 无其他杂晶。根据 Scherrer 公式^[13]:

$$D_{hkl} = k\lambda / B_{hkl} \times \cos \theta, \quad (1)$$

式中: D_{hkl} 为垂直于晶面 (hkl) 的平均晶粒尺寸; B_{hkl} 为衍射峰的半高宽; $k=0.89$; θ 为相应的衍射峰所对应的衍射角的一半; λ 为 X 射线的波长。计算出在 500、600、700、800、900 °C 下形成的 CoAl_2O_4 粉体的晶粒尺寸分别为 19.8、22.5、24.8、25.1 和 25.8 nm, 说明随着烧结温度的升高, 晶粒尺寸逐渐变大。综合考虑煅烧温度对粉体晶型和晶粒尺寸的影响, 确定 CoAl_2O_4 粉体的粉体的煅烧温度为 700 °C 为宜。

3.2 CoAl_2O_4 粉体的透射电镜图谱

图 2 中 (a) 是 $\text{P25}(\text{TiO}_2)$ 纳米粉体的透射电镜图谱, (b) 是 CoAl_2O_4 纳米粉体的透射电镜图谱, 从图中可以看出, TiO_2 纳米粉体的粒径大约为 25 nm 左右, CoAl_2O_4 纳米粉体的粒径大约为 30 nm, 与计算所得基本一致, 且两种粉体的粒径比较接近, 复合在一起能够比较好的匹配。由图 2(b) 还可以看出粉体分散性较好。这是由于采用柠檬酸凝胶法制备的 CoAl_2O_4 纳米粉体, 制备过程严格控制合成工艺, 使得粉体分散性较好, 基本是软团聚或不团聚。软团聚经过球磨制备阳极印刷浆体工艺就可以充分的分散。



(a) TiO_2 的透射电镜图谱 (b) CoAl_2O_4 的透射电镜图谱
(a) TME of TiO_2 (b) TME of CoAl_2O_4

图 2 TiO_2 和 700 °C 烧结 CoAl_2O_4 纳米粉体的透射电镜图

Fig. 2 TEMs of TiO_2 and CoAl_2O_4 nanopowders sintered at 700 °C

3.3 CoAl_2O_4 粉体的紫外-可见吸收光谱分析

图 3 所示为 CoAl_2O_4 粉体的紫外-可见吸收光谱, 由图可知, CoAl_2O_4 粉体不仅在紫外光区域有较好的吸收, 在可见光区域 500~700 nm 也存

在吸收峰。根据禁带宽度计算公式^[14]:

$$E_g = hc/\lambda_0 = 1240/\lambda_0, \quad (2)$$

式中: λ_0 为吸收极限波长, E_g 为禁带宽度),计算得到 CoAl₂O₄ 粉体的禁带宽度为 1.69 eV,说明 CoAl₂O₄ 粉体为窄禁带半导体材料,与文献[11, 12]介绍的相符合。

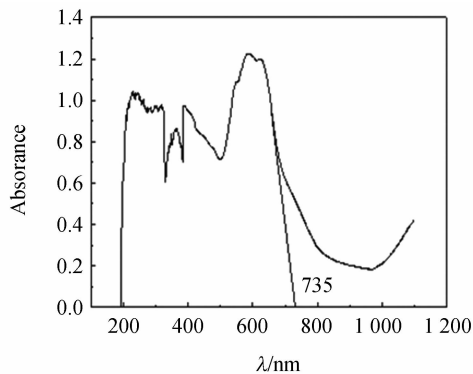


图 3 CoAl₂O₄ 纳米粉体的紫外-可见吸收光谱
Fig. 3 UV-vis spectra of CoAl₂O₄ nano-powders

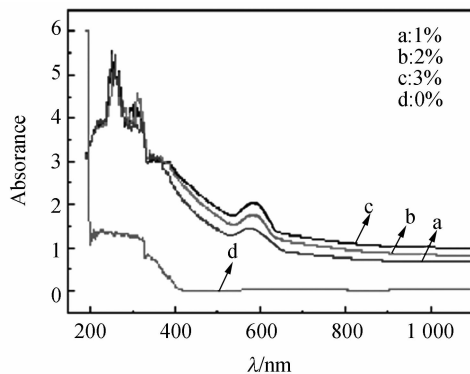


图 4 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜紫外-可见吸收光谱
Fig. 4 UV-vis spectra of CoAl₂O₄/TiO₂ composite films

图 4 是 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜的紫外-可见吸收光谱,由图可见,复合薄膜在紫外区域的吸光度高于纯 TiO₂ 薄膜,且在 600 nm 左右存在吸收峰,这与图 3 中 CoAl₂O₄ 粉体在 600 nm 左右存在吸收峰相吻合,且随着 CoAl₂O₄ 粉体复合量的增加,吸光度逐渐增加。说明 CoAl₂O₄ 粉体复合使 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜光阳极的光吸收增强,CoAl₂O₄ 粉体复合作用得到体现。

3.4 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜的光电性能分析

图 5 是 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池伏安特性曲线。由图可见,光阳极复合尖晶石粉体后电池的短路电流和转化效率都有所增加,但对填充

因子和开路电压影响不大。当掺杂 1% 尖晶石时,短路电流由原来的 9.71 mA/cm² 提高到 13.56 mA/cm²,增加了 40%,转化效率由 3.84% 提高到 4.96%,增加了 29%。这可能是因为尖晶石为窄禁带粉体,不仅能吸收紫外区域的太阳光,对可见光区域也有响应,所以光生载流子增加,使光电流增加,光电转换效率也得到增加。也可能是因为复合的 CoAl₂O₄ 粉体可以作为光生电子和空穴的俘获中心,减少载流子之间的复合,因此暗电流减小,所以转化效率增加。而且,由于两种半导体导带、价带位置不一致而发生交迭,CoAl₂O₄ 受可见光激发产生的电子迅速传递到 TiO₂ 纳米晶表面,降低了电子-空穴的复合几率,增加了向 TiO₂ 薄膜电极传递的光生电子密度,所以光电流增强。另外,从图 2 中可以看到尖晶石粉体的粒径较 TiO₂ 稍大,因此当光照射到尖晶石粉体的表面会增加对太阳光的反射,也会稍许增加光的吸收。当掺杂量进一步增加时,电池性能有所下降,可能是因为尖晶石粉体的复合量增加,使光生电子和空穴的俘获中心之间的平均距离缩短,从而使电子-空穴复合的几率增大,从而转移到外电路的电子减少,所以电池的性能下降。因此,严格控制尖晶石粉体的复合量是必要的。

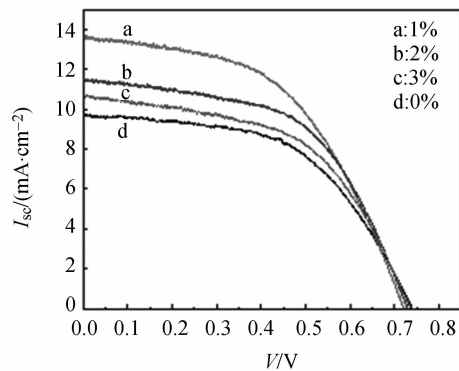


图 5 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池伏安特性曲线
Fig. 5 I-V characteristics of CoAl₂O₄/TiO₂ composite film cells

表 1 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池光电性能数据

| 复合量/% | V_{oc}/V | $J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$ | FF | $\eta/\%$ |
|-------|------------|---|------|-----------|
| 0 | 0.74 | 9.71 | 0.53 | 3.84 |
| 1 | 0.72 | 13.56 | 0.51 | 4.96 |
| 2 | 0.73 | 11.44 | 0.55 | 4.56 |
| 3 | 0.74 | 10.67 | 0.52 | 4.11 |

3.5 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池 IPCE

图 6 为 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池 IPCE 曲线,由图中可以看出,CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池在可见光区 IPCE 峰值,这与 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜的紫外-可见吸收光谱一致,说明复合 CoAl₂O₄ 后可见光吸收增强,光量子效率提高,产生的光电流增加,因而提高了电池转化效率。

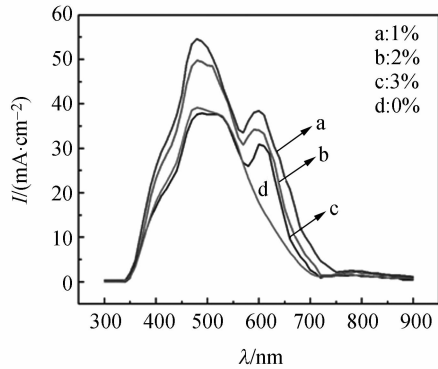


图 6 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池的 IPCE

Fig. 6 IPCE of CoAl₂O₄/TiO₂ composite film cell

3.6 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池稳定性

图 7、图 8 分别为纯 TiO₂ 薄膜电池和复合 1% CoAl₂O₄ 尖晶石粉体电池在相同工艺下的稳定性对比曲线。由图中可以看出,两种电池的转化效率都出现先增加后减小的趋势,由表 2、表 3 也可以看出,当电池放置一天后,纯 TiO₂ 薄膜电池的转化效率由 3.84% 增加到 4.11%, CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池的转化效率由 4.96% 增加到 5.48%,这可能是因为电池刚组装好,电解质与多孔光阳极接触还不完全,因此在放置一天后,待电解质与电极充分接触后电池的性能有所升高,但是随着时间的增加,电池性能逐渐

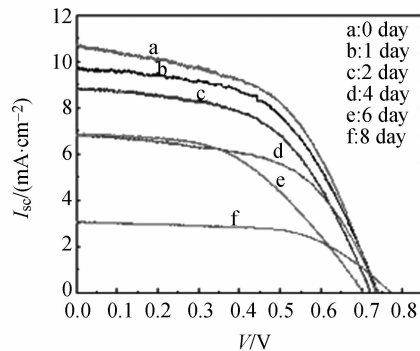


图 7 TiO₂ 薄膜电池稳定性曲线

Fig. 7 Stability curve of TiO₂ film cells

由于电解质的挥发和染料的脱附造成的(电池只做边缘胶封,未做热熔封装,观察快速衰减现象,对比稳定性)。8 天之后纯二氧化钛光阳极的电池转化效率下降了 64%,此时转化效率只有 1.39%;而 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池转换效率下降了 44%,此时转化效率是 2.76%,说明复合薄膜能够一定程度上改善电池的稳定性。原因是两种光阳极同时随着电解质挥发和染料脱附使性能同步下降,而 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜光阳极的 CoAl₂O₄ 纳米晶吸收可见光谱的优势显现出来,对减缓转化率下降做出了贡献。

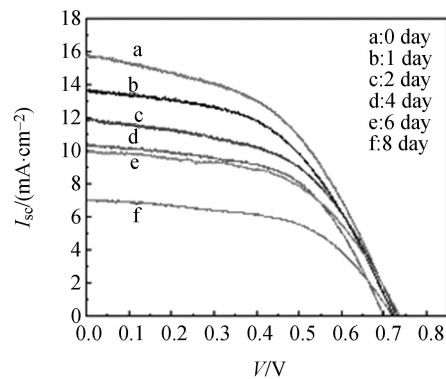


图 8 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池稳定性曲线

Fig. 8 Stability curves of CoAl₂O₄/TiO₂ composite film cells

表 2 TiO₂ 薄膜电池稳定性数据

Tab. 2 Stability data of TiO₂ film cells

| 时间/day | V _{oc} /V | I _{sc} (mA · cm ⁻²) | FF | η/% |
|--------|--------------------|--|------|------|
| 0 | 0.74 | 9.71 | 0.53 | 3.84 |
| 1 | 0.74 | 10.67 | 0.52 | 4.11 |
| 2 | 0.72 | 8.76 | 0.54 | 3.41 |
| 4 | 0.74 | 6.78 | 0.43 | 2.83 |
| 6 | 0.70 | 6.8 | 0.53 | 2.53 |
| 8 | 0.77 | 3.05 | 0.59 | 1.39 |

表 3 CoAl₂O₄/TiO₂ 复合薄膜电池稳定性数据

Tab. 3 Stability data of CoAl₂O₄/TiO₂ composite film cells

| 时间/day | V _{oc} /V | I _{sc} (mA · cm ⁻²) | FF | η/% |
|--------|--------------------|--|------|------|
| 0 | 0.72 | 13.56 | 0.51 | 4.96 |
| 1 | 0.73 | 15.68 | 0.48 | 5.48 |
| 2 | 0.73 | 11.91 | 0.52 | 4.49 |
| 4 | 0.70 | 10.36 | 0.56 | 4.04 |
| 6 | 0.73 | 9.86 | 0.54 | 3.93 |
| 8 | 0.72 | 6.95 | 0.55 | 2.76 |

4 结 论

采用柠檬酸法制备了 CoAl₂O₄ 纳米粉体。煅烧温度为 700 °C 时 CoAl₂O₄ 粉体的晶型完整, 粒径为 24.8 nm, 禁带宽度为 1.69 eV。

参考文献:

- [1] WU J H, ZHANG L, HUANG M L, *et al.*. A novel thermosetting gel electrolyte for stable quasi-solid-state dye-sensitized solar cells [J]. *Adv Mater.*, 2007, 19:4006-4011.
- [2] 尹艳红, 薛载坤, 杨宝宁, 等. 染料敏化太阳能电池纳晶 TiO₂ 多孔薄膜研究进展[J]. 河南师范大学学报, 2011, 39(1):119-122.
YIN Y H, XUE Z K, YANG B N, *et al.*. Progress of the nanocrystalline TiO₂ porous film in dye-sensitized solar cells [J]. *Journal of Henan Normal University*, 2011, 39(1):119-122. (in Chinese)
- [3] 徐波, 吴季怀, 范乐庆, 等. 表面活性剂对染料敏化太阳能电池光电性能的提高[J]. 无机化学学报, 2008, 24(11):1900-1906.
XU B, WU J H, FAN L Q, *et al.*. Effect of surfactant on properties of Dye-sensitized solar cell [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2008, 24(11):1900-1906. (in Chinese)
- [4] 王乐, 吴季怀, 兰章, 等. 柔性染料敏化太阳能电池多空纳米 TiO₂ 薄膜的制备[J]. 化学通报, 2011, 56(16):1317-1321.
WANG Y, WU J H, LAN ZH. Preparation of porous nanoparticle TiO₂ films for flexible dye-sensitized solar cell [J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(16):1317-1321. (in Chinese)
- [5] MATEJA H, URŠA O, MARKO B, *et al.*. One step preparation of TiO₂ layer for high efficiency dye-sensitized solar cell [J]. *Acta Chim. Slov*, 2010, 57:405-409.
- [6] ZENG L Y, DAI S Y, WANG K J, *et al.*. Mechanism of enhanced performance of dye-sensitized solar cell based TiO₂ films treated by titanium tetrachloride [J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(9):1835-1837.
- [7] WANG Z S, HUANG C H, HUANG Y Y. A highly efficient solar cell made from a dye-sensitized ZnO-covered TiO₂ nanoporous electrode [J]. *Chem. Mater.*, 2001, 13(2):678-682.
- [8] ZABAN A, CHEN S G, CHAPPEL S. Bilayer nanoporous electrodes for dye sensitized solar cells [J]. *Chem. Comm.*, 2000, 22:2231.
- [9] 罗文俊, 李朝升, 邹志刚. 探索提高光电极太阳能转换效率的新方法[J]. 中国材料进展, 2009, 28(1):54-59.
LUO W J, LI ZH SH, ZOU ZH G. New methods to improve solar energy conversion efficiency of photoelectrodes [J]. *Materials China*, 2009, 28(1):54-59.
- [10] 孙旭辉, 包塔娜, 张凌云, 等. 染料敏化太阳能电池的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(1):47-52.
SUN X H, BAO T N, ZHANG L Y. Research progress of dye-sensitized solar cells [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(1):47-52. (in Chinese)
- [11] LI W D, LI J ZH, GUO J K. Synthesis and characterization of nanocrystalline CoAl₂O₄ spinelpowder by low temperature combustion [J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2003, 23:2289-2295.
- [12] 黄丽群. 化学共沉淀法制备陶瓷色料研究进展[J]. 中国陶瓷工业, 2011, 18(2):27-32.
HUANG L Q. The development of research on chemical coprecipitation method for ceramic pigment preparation [J]. *China Ceramic Industry*, 2011, 18(2):27-32. (in Chinese)
- [13] YEJI L, JINHO C, MISOOK K. Comparison of the photovoltaic efficiency on DSSC for nanometer sized TiO₂ using a conventional sol-gel and solvothermal methods [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2010, 16: 609-614.

- [14] 邱剑勋, 王承遇, 陶瑛, 等. TiO_2 与 ZnFe_2O_4 薄膜禁带宽度测定及对光催化效率的影响[J]. 材料导报, 2003, 17(3):81-83.

QIU X J, WANG C Y, TAO Y, *et al.*. Measure-

ment of TiO_2 and ZnFe_2O_4 films, energy-gap and its effect on photocatalytic efficiency [J]. *Materials Review*, 2003, 17(3):81-83. (in Chinese)

作者简介:



胡志强(1956—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,教授,1982年、1984年于大连工业大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为新能源材料、光电功能材料。E-mail: hzq@dlpu.edu.cn



秦颖(1987—),女,河北唐山人,硕士研究生,2010年于大连工业大学获得学士学位,主要从事染料敏化太阳能电池光阳极方向的研究。E-mail: qinying198701@163.com



姜艳彦(1960—),女,辽宁大连人,博士,教授,1983年、1992年分别于大连工业大学获得学士、硕士学位,2008年于大连理工大学获博士学位,主要研究方向为新能源材料,光催化材料研究。E-mail: jiangyy@dlpu.edu.cn



郝洪顺(1979—),男,山东聊城人,博士,讲师,2011年于北京科技大学获博士学位,主要研究方向为新能源材料与太阳能电池光伏工程关键技术研究。E-mail: 15998515606@163.com



高宏(1975—),男,辽宁大连人,博士,教授,1975于大连铁道学院大学获学士学位,1981年于大连铁道学院获硕士学位,1987年于英国伯明翰大学获博士学位。研究方向为无机非金属新材料。E-mail: taoci@dtu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)