

ZnO 纳米线的控制生长及在染料敏化 太阳能电池中的应用

韩龙飞^{1,2}, 钱军民^{1,2}, 崔宁^{1,2}

(1. 西安交通大学材料科学与工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 利用旋涂法在 FTO 导电玻璃板上制备一层 ZnO 籽晶, 再经水热生长, 得到杂乱的和规整的 ZnO 纳米线; 重复该过程, 制备得到带分枝结构的 ZnO 纳米线。利用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、紫外-可见分光光度计和光电转换测试系统等手段, 研究了水热生长条件对 ZnO 形态和晶体结构的影响, 以及它们对染料吸附率和光电转换效率的影响。结果表明: 在生长液中添加聚乙烯亚胺有利于 ZnO 籽晶择优取向单向生长; 原位生长形成的 ZnO 纳米线均为纤锌矿结构, 结晶性良好; 影响带分枝结构 ZnO 纳米线制备的关键因素为悬挂籽晶次数和晶化热处理升温速率。解吸附和光电性能测试结果表明, 相对于初始的 ZnO 纳米线, 带分枝结构的 ZnO 纳米线具有更高的染料吸附率和太阳能转换效率。

关键词: 氧化锌纳米线; 水热生长; 染料吸附率; 转换效率

中图分类号: O614.24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0090-06

Controlled Growth of ZnO Nanowire with Application to Dye-Sensitized Solar Cells

HAN Longfei^{1,2}, QIAN Junmin^{1,2}, CUI Ning^{1,2}

(1. School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The FTO glass coated with ZnO seed layer was prepared by spin-coating, and it was further placed in growth solution to form messy and neat ZnO nanowires (NWs) via hydrothermal growth. By repeating the procedure, branched ZnO NWs were obtained. X-ray diffraction, UV-visible spectrophotometer, and photoelectric conversion test system were employed to analyzed the influences of growth conditions on the morphology and crystal structure of ZnO NWs, and on dye adsorption ratio and conversion efficiency. The results show that the addition of polyethylenimine to the growth solution facilitates the growth of ZnO seed along the optimal crystal face. ZnO NWs are of hexagonal wurtzite structure with good crystallinity. The key factors affecting the formation of branched ZnO NWs are the number of hanging seeds and the heating rate of crystallization heat treatment. Compared with bare ZnO NWs, branched ZnO NWs show higher dye adsorption ratio and conversion efficiency.

Keywords: ZnO nanowire; hydrothermal growth; dye adsorption ratio; conversion efficiency

相对于硅太阳能电池,基于半导体氧化物和有机染料的染料敏化太阳能电池(DSCs)具有廉价、稳定和易制备等优点。DSCs 是一个电化学系统,它以一层宽带隙半导体(TiO_2 或 ZnO)多孔膜作为吸附染料的光阳极^[1-3]。 TiO_2 纳米颗粒和纳米线是研究最为广泛的光阳极材料,其最高转换效率可达 11.2%,但由于电子在传导过程中再复合及湮灭造成的电子损耗,使得进一步提高转换效率变得非常困难。为从根本上解决该问题,有学者对 Fe_2O_3 、 SnO_2 、 CeO_2 等氧化物半导体材料进行了研究,但结果都不是很理想^[4-5]。 ZnO 的能带结构和物理性能与 TiO_2 非常相似,其电子迁移率是 TiO_2 的 $10^2 \sim 10^3$ 倍,因此, ZnO 理应展示出更快的电子迁移速率,从而降低电子传导过程中的损耗^[5-6]。虽然近期研究的 ZnO 太阳能电池的转换效率比较低,但易结晶化和各向异性生长的特点使得 ZnO 被认为是最有希望取代 TiO_2 的光阳极材料^[7-9]。一维 ZnO 光阳极纳米结构(如纳米线、纳米带、纳米管等)已得到了广泛研究^[2,4,6,8-10]。这种结构对电子收集提供直的传导路径,可减小电子传导时的复合概率,从而提高转换效率。Gu 等人通过电化学方法制备了不同长度 ZnO 的纳米阵列,其 DSCs 转换效率仅为 0.2%~0.66%^[10],Xu 等人用液相化学生长法制备的 ZnO 纳米线 DSCs 的转换效率最高也只有 2.1%^[11],原因是纳米线结构有限的比表面积限制了转换效率的提高。带分枝结构的纳米线被认为是提高比表面积和转换效率的一条途径。Suh 和 Baxter 等人采用比较昂贵的化学气相沉积方法制作出一种树枝状 ZnO 纳米线结构,使得转换效率有所提高^[12-13]。

本研究通过溶胶凝胶法在导电玻璃上铺一层 ZnO 溶胶,经晶化热处理后形成 ZnO 籽晶,然后采用水热生长法并控制反应条件,在 FTO 导电玻璃板上直接生长出杂乱的和规整的 ZnO 纳米线,以及带分枝结构的 ZnO 纳米线,将其用作 DSCs 的光阳极,测试分析不同形貌 ZnO 的染料吸附情况及光电转换性能。

1 实验

1.1 实验原料及设备

实验原料:六水硝酸锌($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,分析纯,广州金华太化学试剂有限公司);六亚甲基四胺($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$,分析纯,西安化学试剂厂);乙醇胺($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$,分析纯,国药集团化学试剂有限公司);乙

二醇单甲醚($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$,分析纯,国药集团化学试剂有限公司);聚乙烯亚胺(PEI,质量分数 50%,美国 Sigma 公司);FTO 导电玻璃($\text{SnO}_2:\text{F}$,电阻 $16 \Omega/\text{cm}^2$,武汉格傲科教仪器有限公司);液态电解质(DHS-E36,大连七色光有限公司);DHS-N719 染料($\text{C}_{58}\text{H}_{86}\text{O}_8\text{N}_8\text{S}_2\text{Ru}$,分析纯,大连七色光有限公司);热封沙林膜(DHS-Surlyn1725,大连七色光有限公司)。其他试剂(如无水乙醇等)均为分析纯,实验用水为蒸馏水,所有试剂均未纯化处理而直接使用。

实验设备:水热反应釜(聚四氟乙烯内衬, $\Phi 20 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$)。

1.2 实验步骤

1.2.1 光阳极制备 先用洗液对 FTO 玻璃的表面进行超声清洗,然后分别用丙酮、乙醇和高纯水超声清洗,反复冲洗干净,烘干备用。

籽晶层制备:首先配制 ZnO 溶胶,取一定量的硝酸锌溶于乙二醇单甲醚中,浓度为 0.5 mol/L,之后加入与锌盐等摩尔量的乙醇胺,于 60°C 搅拌 2 h,再室温陈化 2 h,然后利用旋涂法(转速为 2 500 r/min)在玻璃的导电面涂覆一层凝胶,于 450°C 晶化热处理 0.5 h(升温速率 $< 5^\circ\text{C}/\text{min}$),为获得致密的籽晶层,可选择反复涂覆 3~10 次。

籽晶的控制生长:配制 2 种不同的生长液,生长液 I 为 30 mmol/L 六水硝酸锌与六亚甲基四胺的等体积混合水溶液,生长液 II 为在生长液 I 中加入 5 mmol/L 的 PEI 后所得的。将铺有籽晶层的衬底竖直浸没在上述 2 种生长液中,在水热反应釜中于 95°C 密封保温 5 h,清洗烘干后即获得 ZnO 纳米线光阳极。将制备的 ZnO 纳米线再次悬挂晶种,以相同的条件再次水热生长,即可获得分枝结构 ZnO 纳米线光阳极。

1.2.2 解吸附测试 为精确测试不同形貌的 ZnO 光阳极吸附染料的情况,对其进行解吸附测试。首先标定 N719 染料在一定浓度范围内的浓度-吸收关系,精确测量阳极材料的面积并测试其解吸附后染料溶液的吸收光谱图;然后利用吸收强度-浓度曲线的斜率,得到单位面积阳极材料对染料的吸附量。具体实验方法可参见文献[14]。

1.3 样品的表征

采用 PANalytical 公司的 X'Pert Pro 型粉末 X 射线衍射仪(XRD)对 ZnO 纳米线进行物相分析, $\text{CuK}\alpha(\lambda = 1.54056 \text{ nm})$ 辐射,扫描范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$;采用 S-2700 型扫描电子显微镜(SEM)观察样品的形貌,扫描电压为 20 kV;利用北京谱析通用

仪器公司的 TU-1810 型紫外-可见分光光度计测量样品的透过光谱及光阳极的染料吸附率,波长范围为 200~800 nm。

1.4 染料敏化太阳能电池组装与性能检测

染料敏化太阳能电池组装:将 ZnO 光阳极板经干燥 0.5 h 后,浸没在 5 mmol/L 的 N719/无水乙醇中 5 h,取出后用无水乙醇冲洗,避光晾干。用 DHS-Surlyn 1725 热封薄膜制作成具有一定面积的框状结构,夹在 ZnO 光阳极和 Pt 电极之间,在加热玻璃板的同时施加一定的压力将两极板通过热封膜粘到一起,然后通过在 Pt 电极上用超声打的小孔注入电解质 DHS-E36,再用热封膜将小孔封上,即制得 DSCs。

将组装好的电池置于模拟太阳光的照射下,利用线性扫描方法对电极施加偏压,并采用美国吉时利公司的 Keithley2400 数字源表测得电流-电压输出特性曲线。扫描速率取 0.05 V/s,扫描量程为 -0.2~0.6 V。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

图 1 为籽晶层在生长液 I 与 II 中于 95 °C 密封保温生长 5 h、450 °C 晶化热处理后的 XRD 图谱。图谱与 ZnO 的 PDF 卡片 JCPDS No. 36-1451 数据相吻合,表明 2 种样品均为纯纤锌矿结构 ZnO。在生长液 II 中制备的 ZnO 纳米线的(002)晶面衍射峰强度远高于其他晶面的衍射峰强度,表明 ZnO 晶种在生长液 II 中沿 *c* 轴取向生长非常强烈,这与文献[15]所得结论相一致。在生长液 I 中制备的 ZnO 纳米线的最强衍射峰也在 $2\theta=34.5^\circ$ 处,但其强度相对于其他晶面并没有太大的优势,说明这种形态的 ZnO 虽然也是固定取向生长,但没有在生长液 II 中的取向那么强烈,应该为在垂直取向的基础上略带杂乱分布的形态。

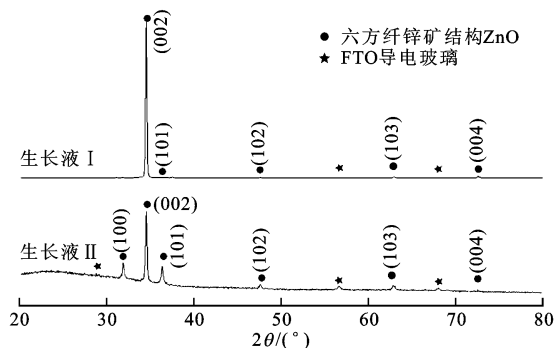


图 1 在 2 种生长液中制得的 ZnO 纳米线的 XRD 图谱

2.2 SEM 分析

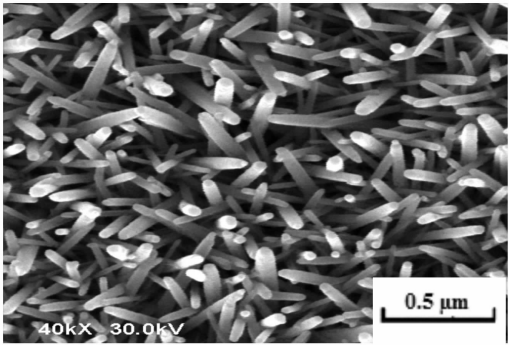
图 2 为 ZnO 纳米线的 SEM 图。籽晶层在生长液 I 中经 95 °C 生长 5 h 后,得到图 2a 所示的杂乱 ZnO 纳米线(标记为 P1)。P1 分布致密且比较均匀,整个薄膜连续性较好,与衬底结合比较紧密,单根一维圆柱形态 ZnO 的直径约为 50 nm 左右。在生长液 II 中生成的规整结构 ZnO 纳米线(标记为 P2)如图 2b 所示,单根直径为 100~200 nm,分布均匀且较为致密,顶端呈规整六边形形态。对比图 2a 与图 2b 并结合 XRD 分析结果可知,生长液中加入 PEI 有利于 ZnO 取向生长。PEI 优先吸附于 ZnO 团簇的一些晶面上,抑制了这些晶面的生长,而暴露于溶液中的晶面(如(002)晶面)可以继续生长,从而形成沿某些晶面择优生长的规整 ZnO 纳米线^[11]。

将 P1 再次悬挂晶种,于 450 °C 晶化热处理 0.5 h(升温速率<5 °C/min),然后在生长液 II 中于 95 °C 生长 5 h,得到图 2c 所示的杂乱分枝结构 ZnO 纳米线(标记为 P3)。将 P2 再次悬挂晶种,并用相同方法处理后,得到图 2d 所示的规整带分枝结构 ZnO 纳米线(标记为 P4)。为得到这种形态的 ZnO 纳米线,初始 ZnO 纳米线一般要做得稀疏一些,可通过在涂覆籽晶过程中减少旋涂次数和降低溶胶浓度得以实现。

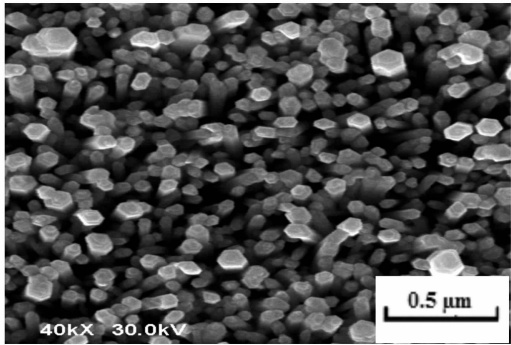
二次悬挂的 ZnO 籽晶与初始 ZnO 纳米线的结合状态直接影响后续的纳米线生长情况。经过数次对比试验,发现二次旋涂次数和晶种晶化热处理的升温速率是影响籽晶悬挂性能的最主要因素。在 P3 的控制生长过程中,采用 10 °C/min 升温,于相同条件下生长后得到图 2e 所示形貌的 ZnO,原因可能是因为升温速率过快导致悬挂的籽晶脱落,随后在水热生长条件下,各个籽晶都不断长大,从而得到更加稠密的杂乱 ZnO 纳米线。在 P4 的控制生长过程中,增加二次悬挂籽晶的旋涂次数至 3 次,其他条件不变,生长后得到图 2f 所示的结构,由于悬挂的籽晶过多,塞满了部分柱体之间的缝隙,导致在残余 PEI 作用下连接成 ZnO 薄层,水热生长后原始柱体变得粗大,ZnO 薄层变厚,最后形成类似蜂窝状的结构。

2.3 解吸附测试

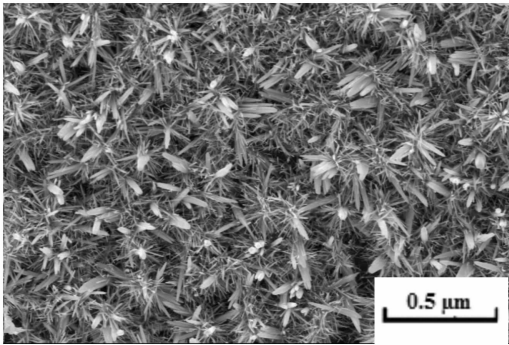
按照 1.2.2 小节所述方法,用体积比为 1:1 的乙醇和去离子水的混合物为溶剂,配制 0.01~0.2 g/L 的 N719 染料溶液,测试其在 523 nm(染料的最强吸收峰)处的吸收强度,得到染料浓度与吸收强度的关系曲线,经拟合后二者呈线性递增关系,线性相关系数



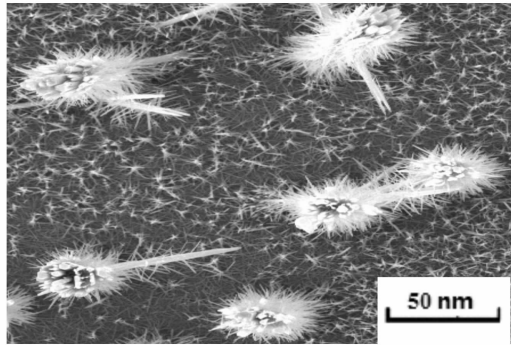
(a) 杂乱 ZnO 纳米线(P1)



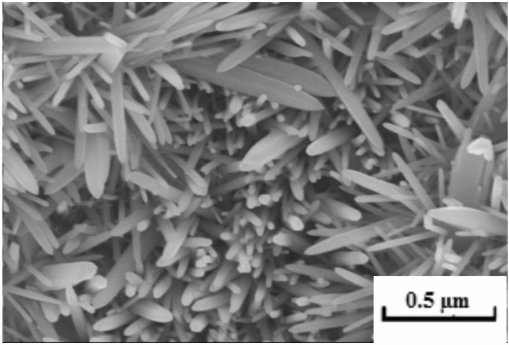
(b) 规整 ZnO 纳米线(P2)



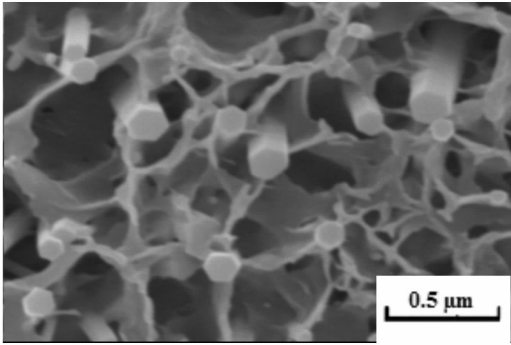
(c) 杂乱分枝结构 ZnO 纳米线(P3)



(d) 规整分枝结构 ZnO 纳米线(P4)



(e) 制备 P3 过程中提高升温速率获得的 ZnO 纳米线



(f) 制备 P4 过程中旋涂 3 次获得的 ZnO 纳米线

图 2 不同制备条件下获得的 ZnO 纳米线形貌(SEM)

为 0.995, 直线斜率为 19.7。配制 0.1 mmol/L 的 NaOH 溶液(水/乙醇为溶剂, 体积比为 1 : 1), 用于解吸附单位面积(1 cm²)的不同形貌 ZnO 光阳极板吸附的染料, 测量吸收光谱图(如图 3 所示), 并记录在 523 nm 处的吸收强度值, 计算出染料吸附率, 见表 1。由表 1 可以看出, 不同形貌 ZnO 纳米线的染料吸附率不同, 依吸附率值由大到小的排序为 P3、P4、P1、P2。带分枝结构的 ZnO 纳米线增大了表面积, 染料吸附率较高。相对于规整排列的形貌, 杂乱分布的 ZnO 纳米线增大了界面的浸润性, 同时纳米线间的空间也有利于染料浸入, 故对染料的吸附效果更好。

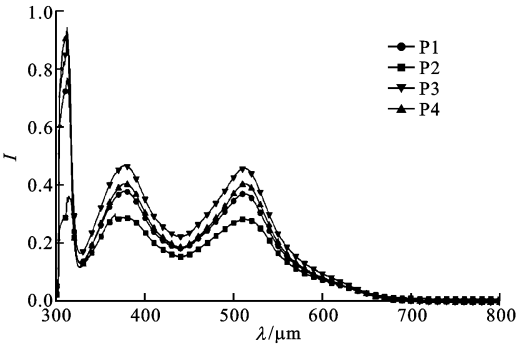


图 3 不同形貌 ZnO 纳米线解吸附 N719 染料的紫外-可见吸收谱

表 1 解吸附测试结果

ZnO 形貌	相对吸收强度 (523 nm 处)	染料吸附率/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$
P1	0.336	171
P2	0.264	125
P3	0.417	212
P4	0.368	187

2.4 DSCs 性能测试

为研究光阳极板吸附染料前、后对不同波段光线的响应吸收情况,选取 P1 光阳极,用紫外-可见分光光度计测试其吸附染料前、后的吸收光谱,结果见图 4。由图 4 可以看出:染料敏化前 ZnO 光阳极板在 300~400 nm 范围内有一定吸收,这属于 ZnO 的本征吸收,而在 400~800 nm 的可见光区基本没有吸收,说明其在可见光区高度透明,而在紫外区具有强遮蔽性^[16];染料敏化后的 ZnO 光阳极不仅在紫外光区间有很好的吸收,而且对 400~450 nm 和 540 nm 的可见光也表现出比较宽的吸收,说明染料敏化使得 ZnO 纳米线的吸收范围从紫外光扩展到可见光,有效拓宽了光阳极的光谱吸收范围。

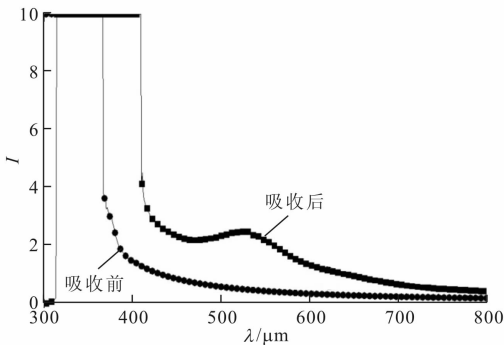


图 4 吸附 N719 染料前、后 ZnO 纳米线的紫外-可见吸收光谱

将组装好的电池置于太阳光模拟器的照射下,利用线性扫描方法对电极施加偏压得到电池的 J-V 特性曲线,如图 5 所示;测试不同电池的开路电压(V_{oc})、短路电流密度(J_{sc})、填充因子(F_f)和转换效率(E_{ta}),结果见表 2。

表 2 不同形貌 ZnO 组成的染料敏化太阳能电池的性能数据

ZnO 形貌	$J_{sc}/\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	V_{oc}/V	F_f	$E_{ta}/\%$
P1	40.47	0.552	32.49	0.726
P2	44.38	0.536	24.68	0.586
P3	66.89	0.490	29.62	0.971
P4	54.54	0.519	30.15	0.859

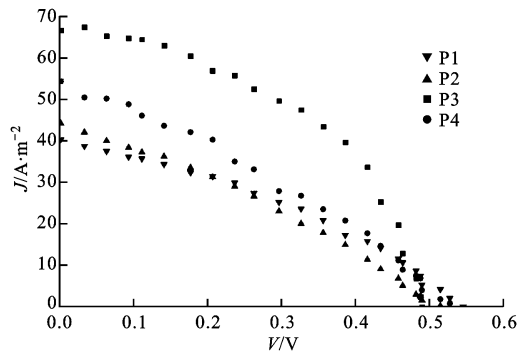


图 5 不同形貌 ZnO 光阳极组成的染料敏化太阳能电池的 J-V 特性曲线

由图 5 及表 2 可以看出,4 种不同形貌的 ZnO 光阳极板组装的 DSCs 按转换效率由高到低排列,依次为 P3、P4、P1、P2,这个结果与表 1 中染料的吸附率结果一致,说明染料是吸收并转换太阳能的主要物质。P3 样品的转换效率可达到 0.971%,相对 P1 样品 0.726% 的转换效率,提高了 33.7%,而这 2 种形态 ZnO 的染料吸附率只有约 24% 的提升,这表明染料敏化太阳能电池中影响转换效率的因素不仅仅只有染料吸附率这一个。ZnO 光阳极作为一种载体,在吸附染料的同时也传导电子。分枝结构的形态虽然增大了 ZnO 的表面积,提高了染料吸附率,但同时也增加了电子的传导路程,增大了电子损耗的概率,不利于转换效率的提高^[4-5]。由此可见,光阳极的结构形态通过对染料吸附量和电子传导的影响,进而影响太阳能的转换效率。

3 结 论

以硝酸锌和六亚甲基四胺等为原料,以 PEI 为控制 ZnO 沿 c 轴取向生长的控制剂,利用原位水热生长法,可在导电玻璃板上直接制备出结晶性良好且表面均匀致密的带分枝结构和不带分枝结构 ZnO 纳米线。相对不带分枝结构的 ZnO 纳米线,分枝结构 ZnO 纳米线,尤其是杂乱分枝结构 ZnO 纳米线,具有更高的染料吸附率和太阳能转换效率,其中染料吸附率可提高约 24%,光电转换效率可提高约 34%。

参考文献:

[1] OREGAN B, GRATZEL M. A low cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films [J]. Nature, 1991, 353: 737-740.
[2] HSIN M C, WEI H C, CHIA H L. Formation of branched ZnO nanowires from solvothermal method

- and dye-sensitized solar cells applications [J]. Phys Chem: C, 2008, 112(42): 16359-16364.
- [3] ZHANG Qifeng, DANDENEAU C S, ZHOU Xiaoyuan. ZnO nanostructures for dye-sensitized solar cells [J]. Adv Mater, 2009, 21(41): 4087-4108.
- [4] ZHU Kai, KOPIDAKIS N, NEALE N R. Influence of surface area on charge transport and recombination in dye-sensitized TiO₂ solar cells [J]. Phys Chem: B, 2006, 110(50): 25174-25180.
- [5] YANG Zhenzhen, XU Tao. Enhanced electron transport in dye-sensitized solar cells using short ZnO nanotips on a rough metal anode [J]. Phys Chem: C, 2009, 113(47): 20521-20526.
- [6] KWANGSUK P, XI Junting, ZHANG Qifeng. Charge transport properties of ZnO nanorod aggregate photoelectrodes for DSCs [J]. Phys Chem: C, 2011, 115(43): 20992-20999.
- [7] XU Feng, DAI Min, LU Yinong. Hierarchical ZnO nanowire-nanosheet architectures for high power conversion efficiency in dye-sensitized solar cells [J]. Phys Chem: C, 2010, 114(6): 2776-2782.
- [8] XU Chengkun, WU Jiamin, DESAI U V. Multilayer assembly of nanowire arrays for dye-sensitized solar cells [J]. J Am Chem Soc, 2011, 133 (21): 8122-8125.
- [9] SOUMITRA K, APURBA D. Simple solvothermal route to synthesize ZnO nanosheets, nanonails, and well-aligned nanorod arrays [J]. Phys Chem: B, 2006, 110(36): 17848-17853.
- [10] GU Zhangjun, PARANS P, XU Jun. Aligned ZnO nanorod arrays grown directly on zinc foils and zinc spheres by a low-temperature oxidation method [J]. Nanotechnology, 2009, 3(2): 273-278.
- [11] XU Chengkun, PAUL S, CAO Liangliang. Preferential growth of long ZnO nanowire array and its application in dye-sensitized solar cells [J]. Phys Chem: C, 2010, 114(1): 125-129.
- [12] SUH D I, LEE S Y, KIM T H. The fabrication and characterization of dye-sensitized solar cells with a branched structure of ZnO nanowires [J]. Chem Phys Lett, 2007, 442(2): 348-353.
- [13] BAXTER J B, AYDIL E S. Dye-sensitized solar cells based on semiconductor morphologies with ZnO nanowires [J]. Sol Energy Mat, 2006, 90(5): 607-622.
- [14] KOO H J, KIM Y J, LEE Y H. Nano-embossed hollow spherical TiO₂ as bifunctional material for high-efficiency dye-sensitized solar cells [J]. Adv Mater, 2008, 20(1): 195-199.
- [15] WONGCHOOSUK C, SUBANNAJUI K, MENZEL A. Controlled synthesis of ZnO nanostructures: the role of source and substrate temperatures [J]. Phys Chem: C, 2011, 115(3): 757-761.
- [16] HUO Yan, HU Yunhuang. Temperature-induced irreversible change of ZnO optical energy gap [J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(2): 1083-1085.

【本刊相关文献链接】

- 张虎,谷伟,李增耀,等. 氧化硅纳米多孔材料表面的水蒸气吸附动力学研究. 2012, 46(3): 1-8.
- 高明琦,徐友龙,白杨. 用于染料敏化太阳能电池的铈、氟双掺杂二氧化钛微球. 2011, 45(12): 87-91.
- 赵婧,李晋闽,夏庆林. Co 掺杂 CaO 材料的铁磁性研究. 2011, 45(11): 112-115.
- 马扬洲,徐友龙,肖芳,等. 影响脉冲电流法制备 MnO₂ 超级电容器电极性能的因素. 2011, 45(9): 114-118.
- 夏玉静,管自生,贺涛. Co 掺杂 ZnO 纳米粉体的结构和光学性能. 2011, 45(7): 65-69.
- 衣明东,许崇海,蒋振钰,等. Al₂O₃ 粉末对 ZrO₂-TiB₂-Al₂O₃ 纳米复合陶瓷材料力学性能的影响. 2011, 45(3): 125-128.
- 周健儿,胡学兵,包启富,等. 纳米 ZnO 改性在 ZrO₂ 微滤膜油水分离过程中的作用. 2011, 45(2): 117-120.
- 黄若轩,孙鹏,朱芳萍,等. 氮气流量对磁控溅射 ZrN 纳米涂层结构及硬度的影响. 2011, 45(1): 137-140.
- 杨靖,陈杰蓉. 金属银负载型 SiO₂ 杂化膜的制备与性能表征. 2010, 44(12): 87-92.
- 李远洁,李金逵,胡晓芬. 射频溅射功率密度对 Ga:ZnO 透明导电薄膜性能的影响. 2010, 44(8): 58-62.
- 张雯,张庆腾,贺永宁. ZnO 纳米线膜的可控生长及其量子限域效应研究. 2010, 44(4): 82-86.
- 连芬,刘红忠,丁玉成,等. TiO₂ 光阳极有序微结构的纳米压印工艺. 2009, 43(11): 90-94.
- 赵景联,李厚宝,黄龙. 磁性纳米 TiO₂/Al₂O₃/Fe₃O₄ 光催化剂的制备及性能研究. 2009, 43(3): 78-81.
- 吴子景,吴晓京,SHEN Wei-dian,等. 集成电路钝化层薄膜的纳米力学性质研究. 2008, 42(11): 1345-1349.
- 郭秀生,于德梅,张宁,等. 溶胶-凝胶法制备 La³⁺、碳纳米管掺杂纳米 TiO₂ 及光催化性能. 2008, 42(10): 1304-1308.
- 丁士文,李梅,王利勇,等. 铁掺杂纳米二氧化钛介孔材料的合成、结构与性能. 2008, 42(9): 1184-1188.
- 朱长纯,陈文会,文常保. ZnO 薄膜声表面波型 SF₆ 气体传感器的研究. 2008, 42(4): 445-449.

(编辑 葛赵青)