



一种螺旋丝状集成的立体吸光太阳电池

刘 勇 沈 辉* 邓幼俊

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 太阳能系统研究所, 广州 510275)

摘要 介绍一种新的螺旋丝状光阳极集成的立体吸光太阳电池, 并在太阳模拟器和自然光下考察了它的性能. 结果表明, 螺旋丝状的光阳极可以从空间各个方向吸光, 具有被动式跟踪阳光的优点, 对太阳方位角和遮阴不敏感, 增大了吸收散射光和周围环境反射光的面积. 与三明治结构的染料敏化太阳电池相比, 在封装工艺上更具优势.

关键词 太阳电池 二氧化钛 染料敏化 纳米晶 光电转换效率

自 1954 年硅太阳电池^[1]被发明以来, 随后发展的各种材料制备的太阳电池^[2~5]如砷化镓、铜铟镓锡、碲化镉、非晶硅及染料敏化太阳电池等都采用平面结构. 平面结构太阳电池的缺点是无法跟踪太阳入射光, 而一天中太阳的高度角和方位角不断地变化, 除在正午时太阳的入射光可以垂直照射到太阳电池平面上, 其他时间太阳光都是斜射到太阳电池平面上, 使平面结构的太阳电池在接收阳光时造成“cosine”能量损失^[6].

在自然界长期进化中, 植物采取了各种利用阳光的合理方式, 如向日葵可以随太阳方位角变化自动将叶面朝向太阳入射光, 主动式地跟踪太阳以接收更多阳光进行光合作用. 带跟踪系统的太阳电池也能够通过跟踪太阳入射光来提高发电量, 但存在机械和自动控制装置的初期投资及运行时电机耗能问题.

许多针叶植物(如松树等)采取了针叶来合理利用太阳光, 并有合理的叶序排列, 针叶在小枝上以多排螺旋上升排列, 植物学家通常称这种螺旋线为斜列线, 并通过数学上证明螺旋线是分形曲线^[7]. 针叶的立体吸光结构可以在 360°范围对称吸光, 无论太阳的直射光从任何一个方位角和高度角入射, 都会被针叶的半个侧圆柱面接收, 这样不用消耗额外的能量就可以被动式地跟踪阳光的角度. 相对于平面结构, 针叶背面的侧圆柱面又可以多吸收来自天空的散射光及地面和周围环境的漫反射光.

染料敏化太阳电池由于其简单的制作工艺、极其低廉的成本和较高的光电转换效率而成为科学研究的热点. 本文以染料敏化太阳电池的原理^[5,8]为基础, 提出了一种新的螺旋丝状集成的立体吸光太阳电池(以下简称立体吸光电池), 模仿松树针叶利用阳光的方式, 被动式地跟

收稿日期: 2005-12-01; 接受日期: 2006-09-11

国家十五攻关项目(批准号: 2004BA411A09)和广东省科技计划项目(批准号: 2004B10301036)资助

* 联系人, [E-mail: shenhui1956@163.com](mailto:shenhui1956@163.com)

踪阳光, 解决平面结构的太阳电池在接收阳光时的“cosine”能量损失问题.

1 实验

1.1 实验材料

联吡啶钌染料(N719)购于 Solaronix 公司, 无水碘化锂(>98%)和碘($\geq 99.55(\text{RT})$)购于 Fluka 公司, 四叔丁基吡啶(99%)购于 Aldrich 公司, P25 型纳米 TiO_2 粉购于德国 Degussa 公司, 钛丝为工业纯钛 TA1, 其他均为分析纯试剂.

1.2 立体吸光太阳电池的制备和工作原理

TiO_2 悬浮液的制备方法是: 将 12 g P25 型纳米 TiO_2 粉放入研钵中, 逐滴加入 4 mL 含 10% 乙酰丙酮的乙醇溶液研磨 30 min, 再将 10.5 mL 水和 0.2 mL 的曲拉通-100 加入后继续研磨 30 min, 得到浆状的悬浮液 A, 再用同样的方法加 12 mL 水制备悬浮液 B, 本文的胶液制备方法与文献 [9] 中常用方法的主要区别是增大了胶液浓度, 可以在金属丝上镀微米级的薄膜.

将直径 0.4 mm, 长 7.5 cm 的钛丝制成螺旋外径 0.19 cm, 长 1 cm 的螺旋丝状电极, 超声波清洗后, 在悬浮液 A 中用立式提膜机提拉成膜后甩膜, 然后将黏附在螺旋电极缝隙上的少量多余溶胶甩掉. 再在悬浮液 B 中重复提拉两次后, 在 450°C 下热处理 30 min. 然后在 0.2 mol/L 的 TiCl_4 水溶液中室温下浸泡 24 h, 再在 450°C 下热处理 30 min. 将电极放入含 5×10^{-4} mol/L N719 染料的无水乙醇溶液中 80°C 下浸泡 3 h, 取出后用无水乙醇清洗, 避光保存.

镀铂的对电极是通过将直径 0.8 mm 钛丝在含 5 mmol/L H_2PtCl_6 的异丙醇溶液中浸泡后, 在 380°C 下热处理 20 min.

将染料敏化的螺旋光阳极和镀铂对电极装入有磨砂端口的玻璃管内, 镀铂对电极在螺旋丝状光阳极的内孔中心, 注入含 0.5 mol/L LiI, 0.05 mol/L I_2 和 0.5 mol/L 四叔丁基吡啶的乙腈电解液, 然后用填塞料填塞端口, 再用环氧树脂封装, 组装成立体吸光电池. 图 1 是立体吸光电池结构和原理示意图.

立体吸光电池的工作原理与三明治式结构的染料敏化太阳电池原理类似, 当入射光照射到吸附在光阳极上的染料后, 染料分子 S 吸收光子而跃迁到激发态 S^* , 由于激发态不稳定, 释放的电子很快注入到 TiO_2 的导带上, 钛丝收集电子后通过外电路回到对电极, 电解质 I_3 通过对电极(阴极)被电子还原成 I^- , 再扩散到光阳极, 被氧化的染料分子 S^* 通过电解液扩散过来的 I^- 还原回到基态 S, 使染料分子得到再生, I^- 被氧化为 I_3 , 电池在光作用下完成一次循环.

1.3 表征和测量

场发射扫描电子显微镜(JSM-6330F)观察光阳极薄膜断面及表面形貌, 并通过标尺测试薄膜厚度. 微孔分析仪(Micromeritics, ASAP 2010)测量样品的比表面积. 太阳模拟器(Oriel, 100 mW/cm^2)测量电池的光电转换效率. 在自然光下测试太阳电池效率的方法参照文献 [10,11], 太阳辐射强度计(SOLARWATT 98)标定太阳的光强, 测试地点为中山大学纳米中心楼顶. 紫外-可见光-近红外分光光度计(HITACHI, 4100)测量电解液的吸收光谱.

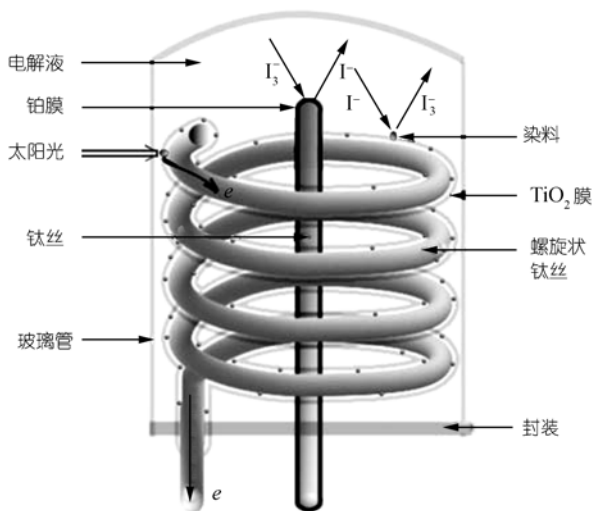


图 1 立体吸光太阳能电池的结构和原理示意图

2 结果和讨论

2.1 TiO₂ 薄膜的微观表征

图 2 是制备的镀 TiO₂ 薄膜的光阳极的扫描电镜照片. 图 2(a)是用扫描电镜观察的镀 TiO₂ 薄膜的光阳极断面, 可以看出 TiO₂ 薄膜膜厚比较均匀, 经标尺确定薄膜的厚度约为 9~11 μm 左右. 图 2(b)为 TiO₂ 薄膜的微观形貌, 统计纳米 TiO₂ 颗粒的平均直径约为 23 nm, 并在薄膜里形成许多纳米孔洞, 有利于染料吸附和电解液的传输.

用 N₂ 吸附法测得的纳米多孔 TiO₂ 的平均孔径为 23 nm, 与扫描电镜测得的 TiO₂ 粒径基本对应. 同时测得 BET 比表面积为 52.56 m²/g, 具有较高的比表面积.

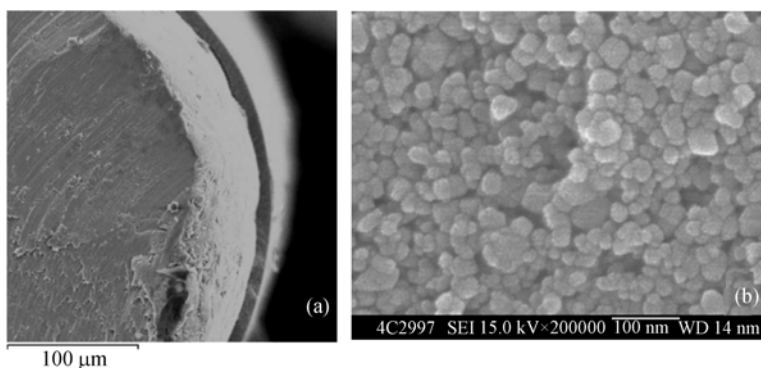


图 2 光阳极的扫描电镜照片

(a) 光阳极断面的扫描电镜图片; (b) TiO₂ 薄膜表面形貌的扫描电镜照片

2.2 立体吸光电池的性能

衡量太阳电池性能的主要技术指标是电池的光电转换效率. 太阳模拟器的氙灯光源是模拟太阳光谱发出的单向入射平行光, 平面太阳电池也是从一个面来接收入射的平行光. 而立

体吸光电池的螺旋光阳极可以在 360° 角范围内吸光, 目前还没有一种模拟器的光源可以从 360° 范围照射到立体吸光太阳电池上, 在太阳模拟器下测试时, 背面的光阳极没有利用到入射光. 而太阳辐射不仅包括直接辐射, 还包括经过大气层产生的散射辐射和来自地面和周围环境的漫反射, 这部分反射光和散射光占了很大一部分比例. 因此传统的太阳模拟器很难评价它的优异性质. 除在传统的太阳模拟器进行测试外, 我们在自然光下考察了它优于平面太阳电池的各种优点.

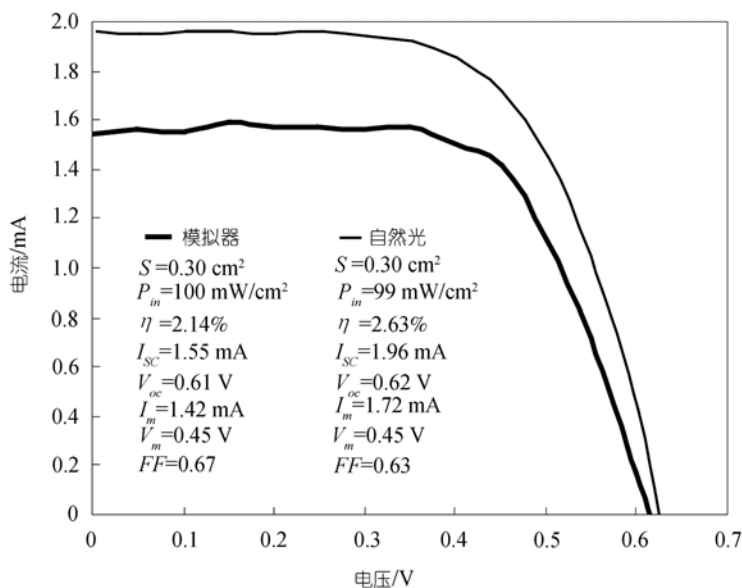
我们定义一个与测试平面太阳电池效率类似的名义光电转换效率(以下简称效率)来评价立体吸光太阳电池的性能. 让模拟器单向平行光或太阳的直射光垂直照射到立体吸光电池侧圆柱面上, 忽略螺旋丝状光阳极间的螺距空隙, 将立体吸光电池光阳极看作一个圆柱面, 取立体吸光电池受光的光阳极侧圆柱面的面积(相当于光阳极侧圆柱面面积的一半)来计算效率和短路电流密度. 立体吸光太阳电池的光电转换效率和填充因子通过如下两式得到:

$$FF = I_m V_m / I_{SC} V_{OC}, \quad (1)$$

$$\eta = I_m V_m / P_{in} = FF V_{OC} I_{SC} / P_{in}, \quad (2)$$

FF 是电池的填充因子; η 是太阳电池的名义光电转换效率; I_{SC} 和 V_{OC} 分别是短路电流和开路电压; I_m 和 V_m 分别是电池处于最大输出功率时的电流和电压; P_{in} 是入射光的功率; S 是立体吸光电池受光的光阳极侧圆柱面面积.

图 3 是分别在太阳模拟器($100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)和中午自然光下($99 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)检测的 I - V 曲线图, 可以看出, 在太阳模拟器下用 Xe 灯的平行光垂直照射立体吸光电池的侧圆柱面, 得到的效率是 2.14%. 经太阳位置计算程序计算^[12], 广州在 9 月 23 日正午时太阳的高度角是 66.73° , 将立体吸光电池和辐射强度计在同一平面上朝南倾斜 23° 角布置, 可以在正午时垂直接收太阳光, 在正午时自然光下测试其效率是 2.63%. 短路电流和效率相对于模拟器下的测试结果均有明显增加, 效率增加了约 23%, 主要是因为太阳模拟器下测试, 光源是单向入射的平行光, 背面的光阳极没有利用到入射光; 而在自然光下, 立体吸光电池除从正面吸收太阳的直射光和散射光外, 螺旋光阳极的背面还可以吸收散射光和周围环境及地面的漫反射光. 散射光即使在晴天时也能占水平面所能接收的总辐射量的 10%~20%, 阴天时会有 50% 以上的比例. 在阳光测试立体吸光电池的地面属于干灰色地面, 对于干灰色地面应有 25%~30% 的反射率^[12]. 同时, 散射光和漫反射光可以认为是各向同性的. 立体吸光电池的光阳极对于散射光和周围环境的漫反射光的接收面积要比相同投影的平面电池高 π 倍. 而测试光强的辐射强度计是以平面朝南单向受光, 无法从背面接收到来自地面的反射光, 接收散射光的面积也小. 所以用平面的硅标准太阳电池或辐射强度计标定的同样光强下, 立体吸光电池在自然光下由于多利用了散射光和反射光的能量, 使光电转换效率比在模拟器下高出许多. 日本 Hitachi 公司以单晶硅制备的双面太阳电池, 背电极作为对正面电极的有效补充, 也作为一个独立的载流子收集器对背面光照和散射光产生作用, 平均一天的发电量比传统的平面太阳电池提高 30%~40%^[13]. 同时立体吸光电池相当于将螺旋丝状光阳极伸向空间吸光, 而安装时只占用其底面积, 本文制备的电池的底面积是受光侧圆柱面的 $1/8$ 左右, 相当于节省了太阳电池的占地面积.

图 3 太阳模拟器和自然光下立体吸光电池的 I - V 曲线

自然光下测试时间为 2005 年 9 月 23 日正午

将立体太阳电池朝南与水平面呈不同角度摆放检测的短路电流如图 4, 可以看出, 电池短路电流对不同角度的摆放不敏感, 但在 120° 和 300° 角时短路电流值最低. 经计算广州 9 月 23 日正午时太阳的高度角为 66.73° , 立体吸光电池光阳极的圆柱面在 120° 和 300° 角时与太阳的直射光接近平行, 此时对于直射来的太阳入射光利用较少. 立体吸光电池与平面太阳电池的明显区别是其在 180° 角以后仍然可以工作, 而平面太阳电池由于单面吸光在这个角度范围内无法利用阳光工作.

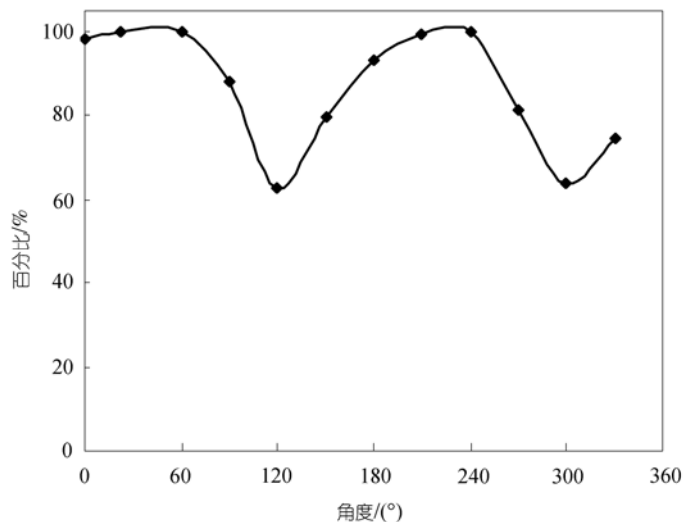


图 4 太阳入射角对短路电流的影响

测试时间为 2005 年 9 月 23 日正午

由于太阳在一天中不同时间的高度角和方位角不断变化, 平板式太阳电池如果不加跟踪系统, 只有在正午时才能接受到垂直入射的太阳光, 其他时间接收到的是斜射光, 而平面电池接收斜射光时太阳光线与电池平面法线的夹角呈余弦关系, 造成“cosine”能量损失, 会降低太阳电池在一天中的发电量。

图5是在一天中不同时刻辐射强度计检测的太阳光强变化。曲线1是调整辐射强度计的角度, 使其与太阳直接辐射光垂直后检测到的光强。曲线2是将辐射强度计朝南 35° 布置检测的太阳光强。可以看到, 上午和下午辐照强度计垂直太阳光检测到的光强比同一时间朝南布置检测的光强高出很多, 早上 8:30 时刻和下午 4:30 时刻垂直太阳直接辐射检测的光强比朝南布置检测的光强分别高出 1.77 和 1.8 倍, 只有在接近正午时, 两者数值接近, 所以跟踪太阳的直接辐射对提高一天中电池发电量很重要。聚光跟踪式光伏系统只能在一定角度内接收太阳直接辐射光, 为了利用太阳光的直接辐射分量, 系统必须随时跟踪太阳, 与此同时, 散射辐射分量浪费了, 这就抵消了这种跟踪系统总是垂直于太阳射线接收最大功率密度的优点^[14], 同时存在设备的初期投资和运行时的能量消耗问题。

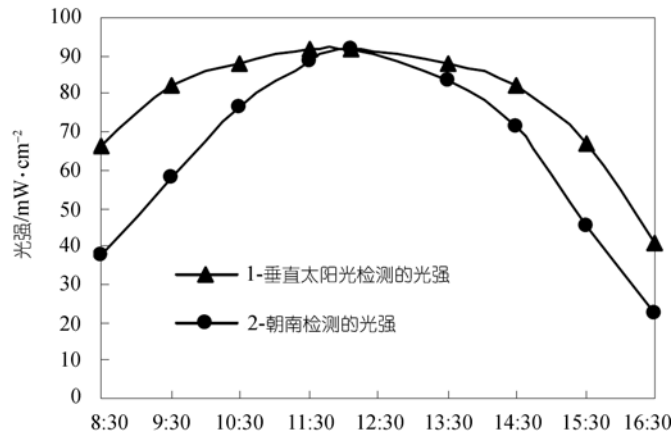


图5 一天中的光强变化

测试时间为 2005 年 10 月 24 日

图6是一天中不同时间立体太阳电池在没有遮挡和有遮挡条件下测试的最大输出功率变化。曲线1是一天中没有遮挡时电池的最大输出功率, 由曲线1可以看到, 立体吸光电池在中午时产电最多, 上午和下午基本上呈对称关系, 这与图5一天中的太阳辐射强度变化规律基本一致。

图6中曲线2是一天中有遮挡时电池的最大输出功率, 用立体吸光电池光阳极圆柱直径两倍的不透光平面遮挡物从南面紧贴在电池上进行遮挡, 测试一天中不同时刻遮挡对电池产电的影响。遮挡后电池在一天中的最大输出功率出现了双驼峰曲线。由图5中一天中的太阳辐射强度曲线可以看到, 越接近中午, 太阳的辐射强度越大, 在上午 9:30 以前和下午 14:30 以后的时间, 太阳的高度角低, 方位角偏向于东方和西方, 此时太阳光线、遮挡物和电池不在一条直线上, 遮挡对电池的产电影响较小, 最大输出功率随着太阳辐射强度的增大而增大。而在上午 9:30 和下午 14:30 之间, 太阳的高度角和方位角的变化使太阳光线、遮挡和电池越来越接近一条直线, 尽管辐射强度在增大, 但遮挡物对太阳直射光的遮挡比例也迅速增大, 使最大输出

功率在接近正午时逐渐变小,并在中午时产电最小.但即使在正午太阳光线、遮挡和电池呈一条直线时,由于立体吸光电池仍可以从其他角度吸收散射光和漫反射光,所以最大输出功率仍然没有完全降为零.而对于平面电池从上面受大于其面积的物体遮挡,无论太阳在任何角度,都无法利用到阳光发电.

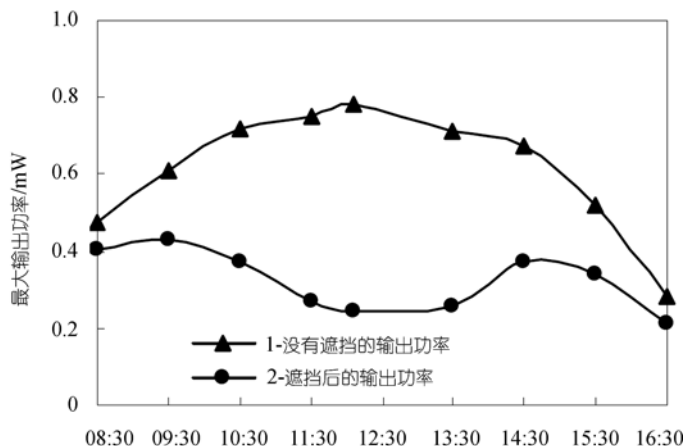


图6 一天中立体吸光电池的输出功率

测试时间为 2005 年 10 月 24 日

用自然光下测试平面太阳电池组件的方法来测试立体吸光电池的效率,在广州测试日期正午时太阳的高度角是 55° ,将立体吸光的太阳电池和辐射强度计在同一平面上朝南倾斜 35° 角布置,可以在正午时垂直接收太阳光.图7是一天中不同时间立体太阳电池在没有遮挡和有遮挡条件下的效率变化.曲线1是立体吸光电池没有遮挡时的效率,由曲线1可以看出,立体吸光电池上午和下午时的效率明显高于正午时的效率,并基本上呈对称关系.在上午8:30和下午16:30时刻效率分别是4.25%和4.22%,正午时电池的效率是2.85%,与正午时效率相比分别高出1.49和1.48倍.这主要是由于无论是辐射强度计还是硅标准太阳电池都是平面结构,它们与被检测的电池同角度放置后,只有在正午时才能接收到垂直于电池平面的太阳直接辐射光,在其他时间接收到的都是斜射光,斜射光与辐射强度计的接收角度基本上呈余弦关系,存在“cosine”能量损失,对应检测的是图5中曲线2对应的光强.而对于立体吸光的太阳电池,由于其在 360° 范围吸光,太阳在天空中任何高度角和方位角射来的光始终被立体吸光的太阳电池的半个侧圆柱面接收,对应接收的是图5中曲线1所对应的光强.同时太阳在上午和下午所处的高度角越低,其散射光所占的成分也越多,更有利于立体吸光电池吸收散射光的能量.因此用有“cosine”能量损失的平面辐射强度计来标定没有“cosine”能量损失的立体吸光电池,会出现上午和下午比中午时效率高的现象.而在日光下用辐射强度计标定平面太阳电池组件时,由于两者都有因平面结构带来的“cosine”能量损失,测试的效率在一天中会近似成一条水平直线.这也说明立体吸光电池对太阳方位角和高度角不敏感,克服了平面太阳电池接收阳光时的“cosine”能量损失问题,具有被动式跟踪太阳光的特点,会提高一天中的发电量.

图7曲线2是一天中立体太阳电池受遮挡时的效率变化.对比图7中曲线1和曲线2可以看出,上午和下午遮挡对于立体吸光电池的效率影响较小,这主要是由于立体吸光电池在 360° 范围内吸光,即使从上面有物体遮挡,在上午和下午时太阳的入射光、遮挡物及立体吸光

电池不在一条直线上, 斜射来的阳光仍然大部分为立体吸光电池的侧圆柱面接收, 所以此时影响很小. 而正午时太阳的直接辐射光、遮挡物和立体电池接近在同一直线上, 遮挡对其效率影响较多, 下降了约 69%, 但立体吸光电池仍然可以从其他角度吸收散射光和漫反射光, 效率不会下降为 0. 而对于平面电池从上面受大于其面积的物体遮挡, 无论太阳在任何角度, 则基本上无光可以利用. 同时这种遮挡对于立体吸光电池的电压没有影响, 即使在中午时遮挡电池后, 其电压也基本不变, 因为开路电压受光强影响较小, 主要取决于氧化物半导体的费米能级与电解液的氧化还原势的差值^[15], 电池仍可以由其他角度吸收散射光和反射光维持其开路电压保持不变.

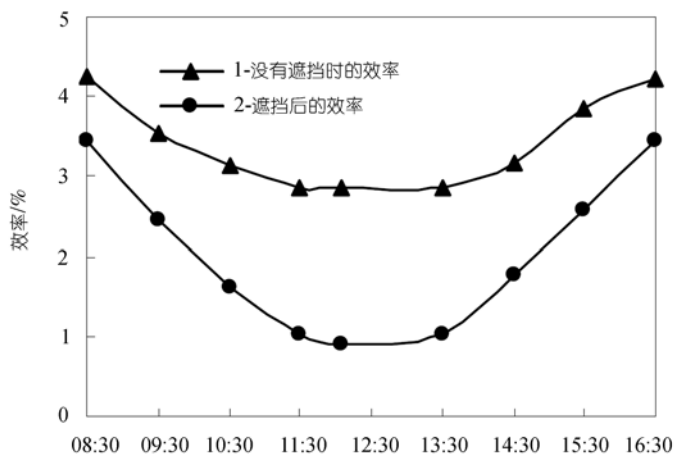


图7 一天中立体吸光电池的效率

测试时间为 2005 年 10 月 24 日

染料敏化太阳电池走向产业化的一个重要难题^[8]是易挥发的液态电解质使三明治式结构的电池密封困难, 影响电池运行的长期稳定性和寿命. 目前更多的研究倾向于用空穴传输材料制备固态染料敏化太阳电池, 但由于固态电解质的离子传输速度慢, 目前效率还很低. 1998 年在 Nature 上首次报道以空穴传输材料制备的固态染料敏化太阳电池效率为 0.74%^[16]. Meng 等人^[17]用含 CuI 的空穴传输材料获得了 3.8% 的转换效率. 但是 CuI 在染料敏化太阳电池中并不稳定, Sirimanne 等人^[18]研究表明以 CuI 制备的染料敏化太阳电池性能衰减很快, 甚至超过液态电解质的电池, 原因是在连续光照下 CuI 会被氧化. 同时染料敏化太阳电池的衬底是以半导体材料 (SnO₂ 掺 F) 为导电膜的导电玻璃, 一般导电玻璃面电阻在 8~100 $\Omega/\square$ 范围内, 电阻太大造成收集电子困难, 也是限制其效率提高和电池大面积制备的重要因素. 一般导电玻璃宽度不大于 1 cm 时才不会明显影响其效率.

与传统的液态染料敏化太阳电池相比, 现代工业对于玻璃管式的封装工艺要比平板玻璃的夹层式封装更成熟, 立体吸光电池在封装工艺上更具优势. 立体吸光太阳电池在衬底上采用耐腐蚀且导电率好的钛丝金属为电极, 不会存在电阻影响效率的问题, 并继承了染料敏化太阳电池低成本的优点.

目前我们初步研制的立体吸光电池已经与固态染料敏化太阳电池具有较接近的效率, 还可以通过以下改进来进一步提高效率. 图 8 是 N719 染料和含 LiI 和 I₂ 的乙腈电解液的吸收光谱.

从图 8 中可以看出, 染料的吸收峰分别在 522 和 382 nm 处, 吸收阈值至 800 nm. 只含 LiI 的乙腈溶液的吸收峰是在 360 nm 处, 并不影响染料对光的吸收, 而 I_2 加入后, I^- 与 I_2 形成 I_3^- 后吸收峰会红移至 484 nm 处, 吸收了大部分 500 nm 以内的可见光. 对于三明治式的染料电池, 光是先到达光阳极再到达电解液. 对于立体吸光电池, 光是先通过电解液再到光阳极, 所以进一步研究无吸光的电解液 [19] 会有助于电池效率的提高. 目前由于我们所用的镀膜工艺的限制, 螺旋状光阳极的螺距留得较大, 改进镀膜工艺(如采用电沉积法等)进一步减小螺距可以提高光阳极的面积, 从而提高效率. 所用的钛丝直径 0.4 mm 较大, 进一步减小钛丝直径, 可以减小光阳极和对电极间的电解液传输距离, 从而提高电池的效率; 还可以减小电池的体积, 进一步增加吸光的比表面积. 目前我们探索了在直径 0.1 mm 的螺旋钛丝上镀 TiO_2 膜工艺, 并已经检测到了较大的光电流, 进一步优化膜厚工艺还在探索中.

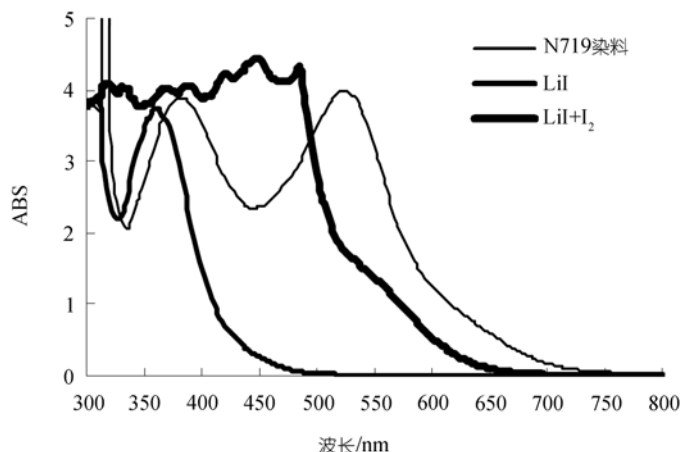


图 8 染料和电解液的吸收光谱

3 结论

(i) 采用螺旋状的钛金属丝制备了具有较高效率的立体吸光太阳电池, 并在太阳模拟器和自然光下考察了它的性能, 在自然光下立体吸光电池表现出与松树针叶吸收阳光类似的特点: 可以从空间各个方向吸光, 具有被动式跟踪阳光的特点, 解决了平面电池在接收阳光时的“cosine”能量损失问题, 增大了吸收散射光和周围环境反射光的面积. 电池对太阳方位角和遮阴不敏感.

(ii) 与传统的液态染料敏化太阳电池相比, 立体吸光太阳电池由于采用耐腐蚀且导电率好的钛丝金属为电极, 不会存在电阻影响效率的问题. 在封装工艺上更具优势. 并与目前正为解决封装问题的固态染料敏化太阳电池具有较接近的效率.

(iii) 立体吸光电池安装时只占用其底面积, 通过螺旋丝状光阳极伸向空间增加对空间的有效吸光面积, 从而提高了单位底面积上太阳电池的输出功率, 相当于节省了太阳电池的占地面积.

参 考 文 献

- 1 Chapin D M, Fuller C S, Pearson G L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. J Appl Phys, 1954, 25: 676—677

- 2 Green M A. Photovoltaics: Technology overview. *Energ Policy*, 2000, 28(14): 989—998[DOI]
- 3 Green M A. The future of crystalline silicon solar cells. *Prog Photovolt Res Appl*, 2000, 8(1): 127—139[DOI]
- 4 Shah A, Torres P, Tscharnner R, et al. Photovoltaic technology: The case for thin-film solar cells. *Science*, 1999, 285(30): 692—698[DOI]
- 5 O'Regan B, Grätzel M. A low cost high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. *Nature*, 1991, 353(24): 737—740[DOI]
- 6 安其霖, 曹国琛, 李国欣, 等. 太阳电池原理与工艺. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- 7 汪富泉, 李后强. 分形——大自然的艺术构造. 济南: 山东教育出版社, 1996
- 8 Grätzel M. Dye-sensitized solar cells. *J Photochem Photobiol C Photochem Rev*, 2003, 4: 145—153[DOI]
- 9 Nazeeruddin M K, Kay A, Rodicio I, et al. Conversion of Light to Electricity by cis-X2bis(2-2'-bipyridyl-4-4'-dicarboxylate) ruthenium(II) charge-transfer sensitizers (X=Cl-, Br-, I-, CN-, and SCN-) on nanocrystalline TiO_2 electrodes. *J Am Chem Soc*, 1993, 115(14): 6382—6390[DOI]
- 10 中国标准出版社, 电池标准汇编——太阳电池卷. 北京: 中国标准出版社, 2003
- 11 胡层明, 怀特 R M. 见: 李采华, 译. 太阳电池. 北京: 北京大学出版社, 1990
- 12 沈 辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术. 北京: 化学工业出版社, 2005
- 13 Wada N, Nakajima H, Araki I, et al. Evaluation studies on bifacial PV systems for their implementation to railway facilities. *Technical Digest of the International PVSEC-14*. Bangkok: Program Committee PVSEC-14, 2004. 913—914
- 14 马丁·格林. 太阳电池工作原理、工艺和系统的应用. 见: 李秀文, 谢鸿礼, 赵海滨, 译. 北京: 电子工业出版社, 1987
- 15 Longo C, Marco A, Paoli D. Dye-sensitized solar cells: A successful combination of materials. *J Braz Chem Soc*, 2003, 14(6): 889—901[DOI]
- 16 Bach U, Lupo D, Comte P, et al. Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO_2 solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies. *Nature*, 1998, 395(8): 583—585[DOI]
- 17 Meng Q B, Takahashi K, Zhang X T, et al. Fabrication of efficient and stable solid state Dye-sensitized solar cell. *Langmuir* 2003, 19: 3572—3574[DOI]
- 18 Sirimanne P M, Jeranko T, Bogdanoff P, et al. On the photodegradation of dye sensitized solid-state $\text{TiO}_2/\text{dye}/\text{CuI}$ cells. *Semicond Sci Tech*, 2003, 18(7): 708—712
- 19 Kebede Z, Lindquist S E. Donor-acceptor interaction between non-aqueous solvents and I_2 to generate I_3^- , and its implication in dye sensitized solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 1999, 57: 259—275[DOI]