

共吸附剂在染料敏化太阳能电池中的应用

李洁 孔凡太 戴松元* 王孔嘉

(中国科学院新型薄膜太阳能电池重点实验室 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 简述了染料敏化太阳能电池中引入共吸附剂对光阳极界面进行修饰的作用机制。按照共吸附剂的分子结构特性和应用状况,初步将共吸附剂划分为胆酸衍生物共吸附剂、链状脂肪酸共吸附剂和多羟基化合物共吸附剂。综述了这几类共吸附剂在染料敏化太阳能电池中的应用状况并进行了展望。

关键词 染料敏化 太阳能电池 共吸附剂 胆酸衍生物

Coadsorbents Used in Dye-sensitized Solar Cells

Li Jie, Kong Fantai, Dai Songyun*, Wang Kongjia

(Key Laboratory of Novel Thin Film Solar Cells, Institute of Plasma Physics,
Chinese Academy of Sciences Hefei 230031)

Abstract In dye-sensitized solar cells, the surface modification of nanocrystalline TiO_2 by coadsorbents was briefly introduced. According to the characteristics of molecular structures, coadsorbents were divided into three kinds such as cholic acid derivatives, amphiphilic long-chain aliphatic acids, polyhydroxyl compounds. The applications and the future developments of coadsorbents in dye-sensitized solar cells were reviewed.

Keywords Dye-sensitized, Solar cell, Coadsorbents, Cholic acid derivatives

1991年,瑞士科学家 Grätzel等^[1]首次将纳米多孔概念引入到染料敏化宽禁带半导体 TiO_2 的研究中,获得了光电转换效率为 7.1%的染料敏化太阳能电池(Dye-sensitized solar cells,以下简称 DSC),这一结果引起了学术界和产业界的广泛关注。目前小面积 DSC的光电转换效率已经超过 12%^[2]。关于 DSC的基本结构和工作原理已有文献报道^[1,3]。在电子的整个传输过程中, TiO_2 薄膜中的光电子易与氧化态染料或电解质中电子受体发生复合(即产生暗电流),这在一定程度上会降低电池的开路电压(V_{oc})和短路电流密度(J_{sc}),从而影响电池的光电转换效率^[4],其中光电子与电子受体的复合是暗电流产生的主要原因。对光阳极进行界面修饰可以达到抑制暗电流的目的,也是提高 DSC性能的一条重要途径。光阳极界面修饰中对 TiO_2 薄膜处理的方法包括有 TiCl_4 溶液处理^[5-7]、表面包覆^[8-10]以及共吸附剂的应用^[11-15]等。相对于前两种方法,在染料溶液中引入共吸附剂使二者共同作用于 TiO_2 薄膜表面,则是一种简单且行之有效的方法。

1 共吸附剂在染料敏化太阳能电池中的作用

共吸附剂在 DSC中已经有较为广泛的应用,尤其是在以有机染料和两亲性钌染料为敏化剂的 DSC中,共吸附剂对电池性能的改善效果更为突出^[15,16]。共吸附剂在 DSC中的主要作用(如图 1)表现为:(1)抑制染料在 TiO_2 表面聚集,提高电子注入效率^[13,15];(2)填补 TiO_2 上没有被染料吸附的空位,与染料共同形成一层绝缘层,阻碍电解液中的电子受体靠近 TiO_2 表面,抑制暗电流^[16];(3)引起 TiO_2 导带边的移动^[17]。同时,共吸附剂的引入还存在弊端,例如,由于共吸附剂与染料在 TiO_2 表面是竞争吸附,

973国家重点基础研究发展计划项目(2006CB202600)、安徽省自然科学基金项目(090414174)和中国科学院知识创新方向性项目(KGCX2-YW-326)资助

2009-06-15收稿,2009-10-15接受

引入共吸附剂在一定程度上会降低染料在 TiO_2 表面的覆盖量^[18];引入共吸附剂减小暗电流有其特定的工作条件,只有在满足这些条件下才能降低暗电流^[19]。

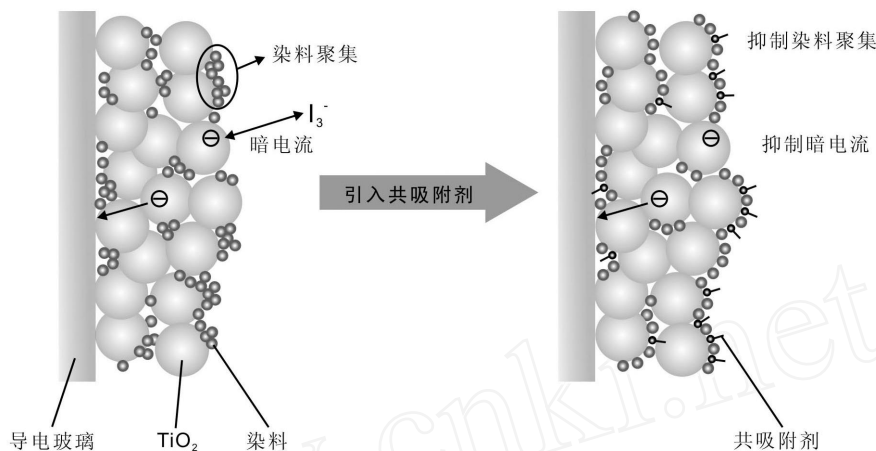


图 1 共吸附剂在光阳极 TiO_2 表面的修饰作用

Fig 1 Surface modification of nanocrystalline TiO_2 by coadsorbents

2 共吸附剂研究现状

自 1993 年, Grätzel 等^[11]在卟啉衍生物敏化太阳电池的染料溶液中引入小分子为共吸附剂,使小分子与染料共同作用于 TiO_2 表面,研究了不同共吸附剂对 DSC 的 IPCE、 I_{sc} 以及 V_{oc} 等参数的影响,并发现胆酸衍生物对电池性能有较好的改善作用。此后,胆酸衍生物在 DSC 中获得了广泛的研究和应用,同时其它各种新的共吸附剂也层出不穷。与染料分子一样,共吸附剂的吸附基团有羧基、磷酸基、羟基、磺酸基等。目前就共吸附剂分子结构特性和其在 DSC 中的应用状况,可分为胆酸衍生物、链状脂肪酸和多羟基化合物 3 类。

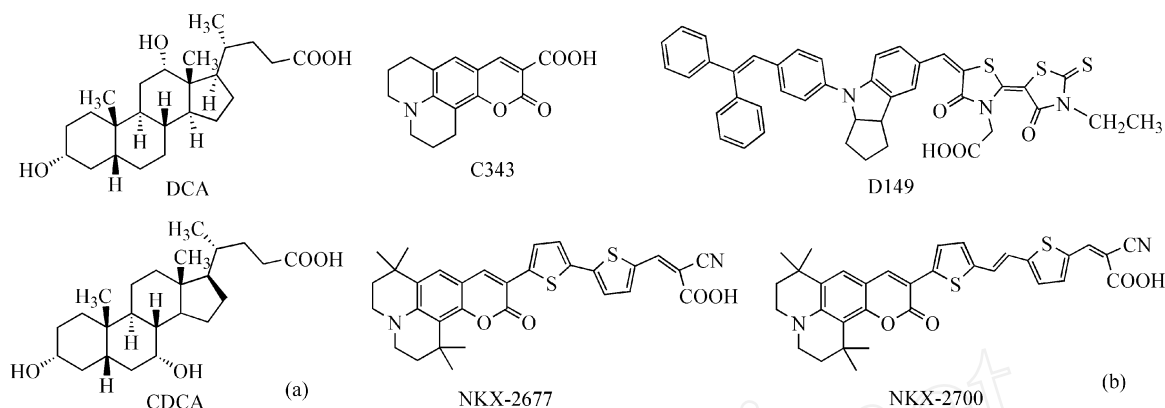
2.1 胆酸衍生物共吸附剂

胆酸衍生物分子通过羧基或羟基吸附于 TiO_2 表面,由于具有疏水面和亲水面而具有手性、两亲性^[11]。胆酸衍生物共吸附剂包括有胆酸、脱氧胆酸(DCA)、鹅脱氧胆酸(CDCA)、牛磺脱氧胆酸^[20]和牛磺鹅脱氧胆酸^[21]等,其主要作用表现为抑制 TiO_2 表面染料的聚集,在以有机染料为敏化剂的 DSC 中有广泛的应用,其中以 DCA 和 CDCA 的应用最为广泛,改善效果也最为明显。图式 1(a)列出了这两种胆酸衍生物的结构。

2.1.1 胆酸衍生物在有机染料敏化太阳电池中的应用 在有机染料敏化太阳电池中,对可见光具有良好吸收性能的染料分子一般都具有平面或接近平面的分子结构,在 TiO_2 表面易于聚集。下面以香豆素染料为例,介绍胆酸衍生物在有机染料敏化太阳电池中的应用情况。几种香豆素染料的分子结构见图式 1(b)。

传统香豆素 C343 的光吸收区域很窄,在其分子中引入双键或噻吩环可以使其吸收光谱红移并扩展其可见光吸收区域。但是,由于共轭体系的增大,分子间 π - π 相互作用力增强,吸附在 TiO_2 表面上的染料由于分子间 π - π 堆叠等作用力而容易发生聚集(见图 1);聚集的产生又会在很大程度上降低染料激发态电子到 TiO_2 导带的注入效率^[11,22]。Hara^[15]和 Wang^[18]等在拓宽了吸收光区的香豆素衍生物 NKX-2677 和 NKX-2700 中引入适量的共吸附剂 DCA,有效地抑制了香豆素衍生物在 TiO_2 表面的聚集,大大提高了电池的光电转换效率,其中,以 NKX-2700 为敏化剂的电池其效率从 5.0% 提高到 8.2%。

DCA 的引入对电池性能的改善主要表现为对电池性能参数 J_{sc} 和 V_{oc} 的提高。在 DSC 中, J_{sc} 主要受光的捕获效率、电荷注入效率以及电子收集效率的影响; V_{oc} 一般认为是由 TiO_2 半导体的准费米能级与电解质中氧化还原电对的氧化还原电势的差值所决定的^[23]。Hara 等^[15]认为共吸附剂 DCA 的引入引



图式 1 (a)胆酸衍生物 DCA 和 CDCA (b)二氢吲哚衍生物 D149 和 3 种香豆素衍生物 C343、NKX-2677 和 NKX-2700 的结构

Scheme 1 The molecular structures of (a) cholic acid derivatives DCA and CDCA; (b) indoline derivative D149 and coumarin derivatives C343, NKX-2677 and NKX-2700

起 J_{sc} 的增加可能有以下两个原因,首先,激发态电子会通过聚集态分子间猝灭而失活,减小光电子到 TiO_2 导带的注入效率,DCA 作为染料聚集抑制剂降低了这种聚集程度,从而提高了光电子的注入效率;其次,DCA 的引入提高了香豆素染料的 LUMO 能级,增大了染料激发态电子到 TiO_2 导带的能量推动力,这有利于提高电子的注入效率。Grätzel 等^[11]的研究认为,DCA 本身具有的酸性也可能使 TiO_2 导带能级正向移动,提高电子注入推动力,使电池的 J_{sc} 增加。以香豆素 NKX-2700 为敏化剂的 DSC 在引入 DCA 之后,虽然染料的吸附量下降了约 50%,而 J_{sc} 却提高了近 33%^[18],同时, V_{oc} 也得到增加,其作用一般被归结为 DCA 与染料在 TiO_2 表面形成的绝缘层在一定程度上阻碍了 TiO_2 半导体中光电子和电解质中 I_3^- 的复合^[15,18]。

与 DCA 相似,CDCA 也能够有效抑制有机染料分子在 TiO_2 上的聚集和抑制暗电流^[24~26]。Uchida 等^[27]在二氢吲哚衍生物(D149,结构见图式 1(b))敏化的 DSC 中,引入一定浓度的 CDCA 和 TBP 之后,电池的效率从 6.51% 增加到 8.00%。Grätzel 等^[28]的研究发现,CDCA 对聚集方酸菁染料激发态自猝灭途径具有抑制作用,使方酸菁染料敏化太阳电池获得了 4.23% 的效率。

2.1.2 胆酸衍生物在无机染料敏化太阳电池中的应用 金属卟啉配合物、金属酞菁配合物及某些金属多联吡啶配合物等染料在 TiO_2 上容易发生聚集。胆酸衍生物作为一类染料聚集抑制剂,对这类染料敏化太阳电池同样起着改善电池性能的作用^[11,29~32]。Hara 等^[29]将共吸附剂 DCA 引入到以钌邻菲咯啉配合物 $\text{Ru}(\text{dcphe})_2(\text{NCS})_2$ (dcphe = 4,7-二羧酸-1,10-菲咯啉)为敏化剂的 DSC 中,所获得的光电转换效率要高于以往所有基于此染料所获得的光电转换效率^[33,34]。Islam 等^[32]在染料芳基取代二酮钌多吡啶配合物中引入共吸附剂 DCA 等优化条件下获得高达 9.12% 的光电转换效率。

酞菁的 Q 带在红光和近红外光区表现出很强的吸收性能,但由于本身易聚集及激发态电子缺少确定的注入方向性,酞菁染料敏化的太阳电池效率一直很低^[35~37]。Yum 等^[30]发现,在不对称 Zn 酞菁染料 TT1^[38,39]中引入共吸附剂 CDCA 之后,电池的 J_{sc} 稍有下降而 V_{oc} 增加。其研究表明, TiO_2 薄膜上染料覆盖量的下降是 J_{sc} 下降的主要原因;同时,CDCA 的引入增加了 TiO_2 纳米薄膜中的电子寿命,并使 TiO_2 带边电势向负向偏移,这两种作用都能提高电池的 V_{oc} 。在引入适当浓度 CDCA 的条件下,电池效率稍有增加^[30]。

N719 染料由于自身分子结构特性,在纳晶半导体表面不易发生聚集。Neale 等^[19]研究了共吸附剂鹅脱氧胆酸四丁基铵盐(TBACDC)对 N719 敏化太阳电池性能参数的影响,发现在 TBACDC 与 N719 等浓度引入时, TiO_2 薄膜上的染料覆盖量下降了 60%, J_{sc} 稍有下降。他们^[19]认为原因是 N719 染料分子在纳米 TiO_2 表面有不同强度的吸附形式,而强吸附形式的染料则可能承担着吸收大部分光子并将光电子注入到半导体导带的工作,这是染料覆盖量下降近一半而 J_{sc} 值仍基本不变的原因。共吸附剂

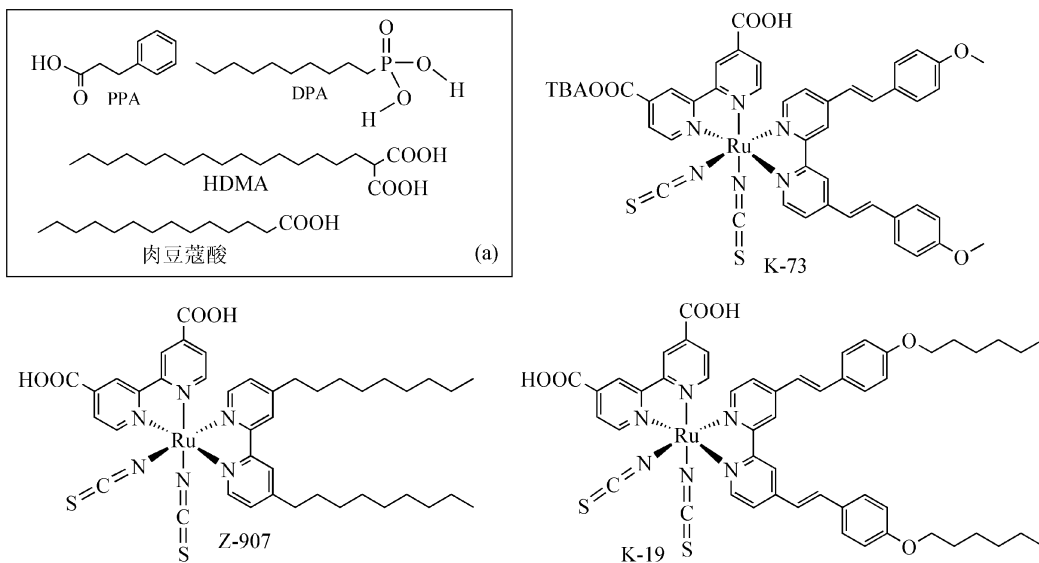
TBACDC使 TiO_2 导带边负向移动,但光阳极暗电流的增加部分抵消了 TiO_2 导带边负移对 V_{oc} 值的贡献; V_{oc} 稍有增加,而电池的效率由于 J_{sc} 的减少则有所下降。

共吸附剂的引入在抑制染料聚集的同时也降低了染料在 TiO_2 表面的覆盖量。在易聚集染料敏化的 DSC中,由共吸附剂抑制染料聚集而提高电子注入效率的贡献,有可能会提高电池的 J_{sc} 。对于不易聚集的染料,染料覆盖量可能成为影响电池 J_{sc} 的主要原因,共吸附剂引入浓度过大,就有可能大幅度降低电池的 J_{sc} 值^[30]。胆酸衍生物共吸附剂在 DSC中的主要作用表现为抑制 TiO_2 表面染料的聚集,同时由于其本身性质还可引起 TiO_2 费米能级、染料 LUMO能级以及暗电流的变化,从而引起 DSC性能参数的改变。

2.2 链状脂肪酸共吸附剂

DSC常采用两亲性钌染料(如 Z-907、K-19)和离子液体电解质以提高所制作的太阳电池的效率 and 稳定性。相关研究^[17,40]表明,电池在加速老化之后, V_{oc} 的下降是电池效率下降的主要原因。在两亲性钌染料敏化太阳电池中引入链状脂肪酸共吸附剂,由于链状脂肪酸与两亲性染料在 TiO_2 表面形成了一层比单独染料吸附时更稳定的混合单分子层,能够更有效地抑制暗电流和稳定 V_{oc} ,因此,链状脂肪酸共吸附剂的引入在提高了 DSC电池效率的同时增加了电池的长期稳定性^[40~42]。

应用于 DSC的链状脂肪酸共吸附剂一般为线型链状分子。分子一端为吸附基团,另一端为疏水的脂肪烃链(图式 2(a))。依照脂肪烃链的形状可将应用于 DSC的链状脂肪酸共吸附剂分为直链脂肪酸、环状脂肪酸和末端含有胍基等极性基团的脂肪酸。其中直链脂肪酸包括有癸膦酸(DPA)、十六烷基丙二酸、肉豆蔻酸等;环状脂肪酸有 3-苯基丙酸(PPA)、环己基乙酸、金刚烷基乙酸等;末端含极性基团的脂肪酸则包括 4-胍基丁酸(GBA)、4-胍基乙酸(GAA)等。目前,在以两亲性钌染料为敏化剂的 DSC中常用的链状脂肪酸共吸附剂为 PPA和 DPA。



图式 2 几种两亲性钌联吡啶配合物的分子结构;(a)几种链状脂肪酸共吸附剂的分子结构

Scheme 2 The molecular structures of several amphiphilic ruthenium sensitizers

(a) several long-chain aliphatic acid coadsorbents

2.2.1 PPA在两亲性钌染料敏化太阳电池中的应用 共吸附剂 PPA除了与两亲性钌染料在 TiO_2 表面形成混合单分子绝缘层之外,由于其分子相对较小,还可以进入到钌染料分子无法进入的小尺寸纳米 TiO_2 薄膜孔洞中并吸附在 TiO_2 表面,阻碍薄膜孔洞中电解质的电子受体(如 I_3^-)与 TiO_2 薄膜中光电子的复合^[17](图 1)。

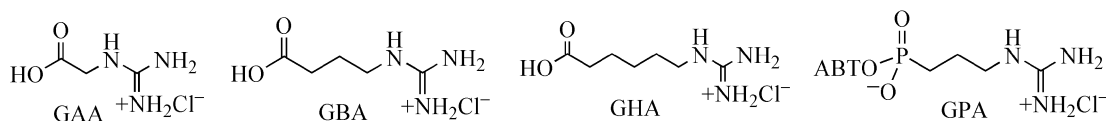
Wang等^[17]在基于二元离子液体电解质的 Z-907敏化太阳电池中引入共吸附剂 PPA,获得高达 7% 的光电转换效率,电池的 J_{sc} 增加明显。他们认为 J_{sc} 增加的主要原因是:(1) Z-907/PPA 混合单分子层

有效降低了 TiO_2 薄膜中光电子的损失; (2) Z-907/PPA 混合单分子层可能增加了 TiO_2 薄膜中光电子的传输迁移率,提高了导电基底对光电子的收集效率。引入 PPA 共吸附剂后的电池具有很好的光稳定性^[17]。这种电池在基于另一种新的离子液体电解质时,同样获得 7.0% 的光电转换效率,经 80 热老化处理之后电池效率保持在原来的 90%^[43]。在具有高消光系数的两亲性钌染料 K-19 敏化的太阳电池中,共吸附剂 PPA 的引入同样具有改善电池性能的作用^[41,42,44]。

2.2.2 DPA 在两亲性钌染料敏化太阳电池中的应用 共吸附剂 DPA 在 DSC 上的作用机理与 PPA 相似,不同点在于其以膦酸基为吸附基团。DPA 在 TiO_2 表面形成的 P—O—Ti 键要强于羧酸在 TiO_2 形成的 C—O—Ti 键^[45,46]。由于 DPA 的强吸附能力会明显减少染料在 TiO_2 表面的覆盖量,因此,在 DSC 优化处理中,DPA 的引入量相对于 PPA 要少得多^[16,40,47]。2005 年,Wang 等^[16,47]将 K-19/DPA 混合单分子层引入到 DSC 中,获得了光电转换效率超过 8% 的高稳定太阳电池。热老化 (80 °C, 1000h) 处理之后, V_{oc} 由原来不含 DPA 时的下降 70mV 减弱到只下降 25mV, 电池效率保持在原来的 98%。DPA 的引入对电池稳定性的增强效果较 PPA 更加明显^[16,40,47]。

共吸附剂 PPA 或 DPA 与两亲性钌染料在 TiO_2 表面形成了一层比单独染料吸附时更坚固、致密的混合单分子层,有效地抑制了 TiO_2 薄膜中光电子与电解质中电子受体的复合,稳定 TiO_2 半导体的费米能级,在提高电池效率的同时也延长了电池的使用寿命。链状脂肪酸的应用对制作高效、高稳定 DSC 有一定的贡献。

2.2.3 胍基脂肪酸在两亲性钌染料敏化太阳电池中的应用 在电解质中引入胍盐,吸附在 TiO_2 表面的胍基阳离子能够有效抑制暗电流^[48]。Zhang 等^[49]将带有胍基的共吸附剂 GBA 引入到 DSC 中,发现 GBA 的引入在降低了 TiO_2 中光电子与电解液中 I_3^- 的复合速率,同时使 TiO_2 导带向负向移动,有效提高电池的 V_{oc} 约 50mV。随后,他们^[50]以 N-719 为敏化剂,研究了系列 胍基脂肪酸 (图式 3) 对电池 V_{oc} 的影响,结果表明, 胍基脂肪酸的引入引起的 TiO_2 表面钝化和 TiO_2 带边能级负向移动使 V_{oc} 增加 30 ~ 80 mV。



图式 3 几种 胍基脂肪酸的分子结构

Scheme 3 The molecular structures of several α -guanidinoalkyl acids

2.3 多羟基化合物共吸附剂

酸类共吸附剂在吸附到 TiO_2 薄膜上之后,有可能会使 TiO_2 表面质子化,引起 TiO_2 的导带能级正移,部分抵消共吸附剂由于抑制暗电流对电池 V_{oc} 的增值。1993 年,Kay 等^[11]对多羟基化合物甘油、山梨醇和葡萄糖与胆酸类衍生物对电池 V_{oc} 的影响进行了对比,发现多羟基化合物由于不存在对 TiO_2 表面质子化问题,其对吡啶敏化太阳电池的 V_{oc} 的提高要高于胆酸衍生物共吸附剂。

3 前景与展望

在染料溶液中引入共吸附剂这种简单易行的方法已经在 DSC 的研究获得了广泛应用。不同的染料、电解质等体系中需要不同及适当浓度的共吸附剂以达到最好的界面修饰效果。前期的共吸附剂研究主要集中在共吸附剂对电池光伏性能和稳定性的影响上。就目前对共吸附剂的研究报道,共吸附剂的引入对 DSC 性能的影响主要表现在对电池 J_{sc} 和 V_{oc} 的改善。

共吸附剂提高电池 J_{sc} 的作用表现在: (1) 减少染料在 TiO_2 表面的聚集,从而减少激发态电子由于聚集态分子间的猝灭而失活,增加激发态光电子到 TiO_2 导带的注入效率; (2) 提高染料的 LUMO 能级,增加染料 LUMO 能级和 TiO_2 导带间的能级差,增加电子注入能力; (3) 降低 TiO_2 导带能级 (E_{CB}), 提高染料 LUMO 能级和 TiO_2 导带间的能级差,增加电子注入能力; (4) 抑制暗电流,减少 TiO_2 中光电子

到电解液中的流失。共吸附剂提高电池 V_{oc} 的作用表现在:提高 TD_2 导带能级 (E_{CB}),抬高费米能级;抑制暗电流,提高 TD_2 薄膜中光电子寿命。

对于有机染料,常使用胆酸衍生物共吸附剂以达到对有机染料聚集的抑制和提高电子注入效率。目前,已有大量的实验证明,胆酸衍生物对有机染料敏化太阳电池性能改善具有明显作用。对于两亲性钌染料共吸附剂,选择较小、较稳定的共吸附剂有利于光阳极暗电流的抑制和电池稳定性的增加。

在 DSC 中,光阳极表面的共吸附剂与染料的作用环境实际上是很复杂的,目前所见的文献报道对共吸附剂作用的机制多停留在上述几方面的推测上,缺乏直接或间接的实验证据,关于共吸附剂作用的微观机理等方面尚缺乏深入研究。共吸附剂与染料之间的相互作用方式、共吸附剂与染料之间的作用以及它们与 TD_2 表面的界面作用方式等微观机制还有待进一步研究和讨论。对共吸附剂作用机制的研究将有助于深入了解光阳极界面特性和电池的微观机理,对制作高效率、高稳定太阳电池和降低其制作成本,促进 DSC 的产业化有一定的积极意义。

参 考 文 献

- [1] B O Regan, M Grätzel Nature, 1991, 353: 737 ~ 740.
- [2] M Grätzel 3rd International Conference on the Industrialisation of DSC, Nara, Japan, April 2009.
- [3] A Hagfeldt, M Grätzel Acc Chem Res, 2000, 33 (5): 269 ~ 277.
- [4] S Y Huang, G Schlichthorl, A J Nozik et al J Phys Chem B, 1997, 101 (14): 2576 ~ 2582.
- [5] M K Nazeeruddin, A Kay, I Rodicio et al J Am Chem Soc, 1993, 115 (14): 6382 ~ 6390.
- [6] L Y Zeng, S Y Dai, K J Wang et al Chin Phys Lett, 2004, 21 (9): 1835 ~ 1837.
- [7] S Ito, P Liska, P Comte et al Chem Commun, 2005, (34): 4351 ~ 4353.
- [8] Z S Wang, C H Huang, Y Y Huang et al Chem Mater, 2001, 13 (2): 678 ~ 682.
- [9] S S Kim, J H Yum, Y E Sung J Photochem Photobiol A, 2005, 171 (3): 269 ~ 273.
- [10] F Lenzmann, J Krueger, S Burnside et al J Phys Chem B, 2001, 105 (27): 6347 ~ 6352.
- [11] A Kay, M Grätzel J Phys Chem, 1993, 97 (23): 6272 ~ 6277.
- [12] K Hara, H Sugihara, Y Tachibana et al Langmuir, 2001, 17 (19): 5992 ~ 5999.
- [13] K Hara, M Kurashige, Y Dan-oh et al New J Chem, 2003, 27: 783 ~ 785.
- [14] P Wang, S M Zakeeruddin, P Comte et al J Phys Chem B, 2003, 107 (51): 14336 ~ 14341.
- [15] K Hara, Y Dan-Oh, C Kasada et al Langmuir, 2004, 20 (10): 4205 ~ 4210.
- [16] P Wang, C Klein, R Humphry-Baker et al Appl Phys Lett, 2005, 86 (12): 123508.
- [17] N R Neale, N Kopidakis, J Lagemaat et al J Phys Chem B, 2005, 109 (49): 23183 ~ 23189.
- [18] P Wang, S M Zakeeruddin, R Humphry-Baker et al Chem Mater, 2004, 16 (14): 2694 ~ 2696.
- [19] Z S Wang, Y Cui, Y Dan-Oh et al J Phys Chem C, 2007, 111 (19): 7224 ~ 7230.
- [20] F Odobel, E B lart, M Lagr é et al J Mater Chem, 2003, 13: 502 ~ 510.
- [21] M K Nazeeruddin, P P éhy, T Renouard et al J Am Chem Soc, 2001, 123 (8): 1613 ~ 1624.
- [22] A C Khazraji, S Hotchandani, S Das et al J Phys Chem B, 1999, 103 (22): 4693 ~ 4700.
- [23] A J Frank, N Kopidakis, J Lagemaat Coord Chem Rev, 2004, 248 (13-14): 1165 ~ 1179.
- [24] D P Hagberg, J H Yum, H Lee et al J Am Chem Soc, 2008, 130 (19): 6259 ~ 6266.
- [25] R Chen, X Yang, H Tian et al Chem Mater, 2007, 19 (16): 4007 ~ 4015.
- [26] J H Yum, S R Jang, P Walter et al Chem Commun, 2007, (44): 4680 ~ 4682.
- [27] T Horiiuchi, H Miura, K Sumioka et al J Am Chem Soc, 2004, 126 (39): 12218 ~ 12219.
- [28] J H Yum, P Walter, S Huber et al J Am Chem Soc, 2007, 129 (34): 10320 ~ 10321.
- [29] K Hara, H Sugihara, Y Tachibana Langmuir, 2001, 17: 5992 ~ 5999.
- [30] J H Yum, S R Jang, R Humphry-Baker et al Langmuir, 2008, 24 (10): 5636 ~ 5640.
- [31] X Li, N J Long, J N Clifford et al New J Chem, 2002, 26: 1076 ~ 1080.
- [32] A Islam, F A Chowdhury, Y Chiba et al Chem Mater, 2006, 18 (22): 5178 ~ 5185.
- [33] M Yanagida, L P Singh, K Sayama et al J Chem Soc, Dalton Trans, 2000, (16): 2817 ~ 2822.
- [34] H Sugihara, L P Singh, K Sayama et al Chem Lett, 1998, (10): 1005 ~ 1006.
- [35] E Palomares, M V Martinez-Diaz, S A Haque et al Chem Commun, 2004, (18): 2112 ~ 2113.
- [36] D Wöhrle, D Meissner Adv Mater, 1991, 3 (3): 129 ~ 138.
- [37] M K Nazeeruddin, R Humphry-Baker, M Grätzel et al J Porphyrins Phthalocyanines, 1999, 3 (3): 230 ~ 237.
- [38] P Y Reddy, L Giribabu, C Lyness et al Angew Chem Int Ed, 2007, 46 (3): 373 ~ 376.

- [39] J J Cid, J H Yum, S R Jang et al. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2007, 46(44): 8358 ~ 8362.
- [40] P Wang, S M Zakeeruddin, S M Zakeeruddin et al. *Adv. Mater.*, 2003, 15(24): 2101 ~ 2104.
- [41] D Kuang, S Ito, B Wenger et al. *J. Am. Chem. Soc.*, 2006, 128(12): 4146 ~ 4154.
- [42] F Mazille, Z Fei, D Kuang et al. *Inorg. Chem.*, 2006, 45(4): 1585 ~ 1590.
- [43] D Kuang, P Wang, S Ito et al. *J. Am. Chem. Soc.*, 2006, 128(24): 7732 ~ 7733.
- [44] F Fabregat-Santiago, J Bisquert, E Palomares et al. *J. Phys. Chem. C*, 2007, 111(17): 6550 ~ 6560.
- [45] S Pawsey, M McComick, S De Paul et al. *J. Amer. Chem. Soc.*, 2003, 125(14): 4174 ~ 4184.
- [46] R Hofer, M Textor, N D Spencer. *Langmuir*, 2001, 17(13): 4014 ~ 4020.
- [47] P Wang, C Klein, R Humphry-Baker et al. *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127(3): 808 ~ 809.
- [48] N Kopidakis, N R Neale, A J Frank. *J. Phys. Chem. B*, 2006, 110(25): 12485 ~ 12489.
- [49] Z P Zhang, S M Zakeeruddin, B C O Regan et al. *J. Phys. Chem. B*, 2005, 109(46): 21818 ~ 21824.
- [50] Z Zhang, N Evans, S M Zakeeruddin et al. *J. Phys. Chem. C*, 2007, 111(1): 398 ~ 403.



戴松元

1967年生于安徽绩溪

2001年获博士学位

中国科学院合肥物质科学研究院研究员,

博士生导师

从事染料敏化太阳电池的研究

Email: sydai@ipp.ac.cn

本刊下期内容预告

纳米羟基磷灰石的制备及其在生物医学方面的应用	毕荣荣	丁海涛	万立骏
羟基磷灰石/胶原矿化机理的研究进展	段书源	洪元萍	刘拥军
脂肪酸糖酯类的合成及应用	孙月娥	王卫东	
锡类络合物在糖衍生物合成中的区域选择性	楼鑫	侯金松	Seamas Cassidy
喹啉类化合物的合成及活性研究进展	贺能琴	严胜骄	林军
金属离子印迹技术研究进展	朱琳琰	张荣华	朱志良
偶氮液晶在光学材料中的应用	韩国志	熊桂荣	谢卓颖
强阳离子多孔整体柱用于生物大分子的分离	杨静	杨更亮	刘海燕
紫杉烷二萜类化合物的定量构效关系研究	李燕	高峰	王永华
离子质电比和相差因子对离子半径的综合标度	余德才	陈雪桥	吴海玉
类硅烯 H ₂ SiLiF 二聚反应的理论研究	吴宁	解菊	
低温溶胶凝胶法制备高致密度碳化硅陶瓷工艺研究	水森	宋岳	舒杰
含丁三醇端基富电子醚链与阳离子环蕃超分子准轮烷的表征和性能研究	杨扬	孙小强	席海涛
临氢化学合成单质铁纳米粒子	张宏玉	刘峰奎	金环年
氯化锌催化合成 3-取代-4-(3H) 喹啉酮衍生物	王敏	宋志国	张婷婷