

TiO₂ 形态对 MAPbBr₃ 太阳电池转化效率影响机制的研究

张 敏, 王增华, 郑霄家, 张文华

(中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川省新材料研究中心, 成都 610200)

摘 要: 二氧化钛(TiO₂)是钙钛矿太阳电池中最常用的电子传输材料, 研究发现其形态对 MAPbBr₃ 太阳电池的器件转化效率可产生直接影响。研究不同形态 TiO₂ 对钙钛矿太阳电池转化效率的影响机制对进一步认识此类太阳电池的工作机理十分必要。本工作使用旋涂法制备了不同形态的 TiO₂, 而后采用反溶剂室温结晶的方法在 TiO₂ 基底上进一步制备 MAPbBr₃(MA = CH₃NH₃)薄膜, 并通过 X 射线光电子能谱(XPS)详细研究了 TiO₂ 与 MAPbBr₃ 接触界面的能级位置关系。研究结果表明: 不同形态的 TiO₂ 在与钙钛矿接触后形成的导带差异不同; 不同的导带能级差可直接影响 MAPbBr₃ 钙钛矿电池中电子的传递与收集, 进而影响电池的转化效率。

关 键 词: 能级位置; XPS; MAPbBr₃; 钙钛矿电池

中图分类号: TQ174 **文献标识码:** A

Structural Effect of TiO₂ on the Performance of MAPbBr₃ Solar Cells

ZHANG Min, WANG Zeng-Hua, ZHENG Xiao-Jia, ZHANG Wen-Hua

(Sichuan Research Center of New Materials, Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China)

Abstract: TiO₂ is frequently used as electron transport layer in perovskite solar cells, and its structure can directly affect the performance of MAPbBr₃ solar cells. It is necessary to investigate the structural effect of TiO₂ to further understand the working mechanism of such kind solar cells. TiO₂ thin films with different morphology were prepared by spin coating, and MAPbBr₃ (MA = CH₃NH₃) thin films were further deposited on it through anti-solvent assisted crystallization approach. Then, energy band alignment between TiO₂ and MAPbBr₃ were characterized by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). According to the experimental results, TiO₂ with different morphology possessed different electronic structures and yield different band alignment after contacting with MAPbBr₃ perovskite layer. The difference of conduction band value between TiO₂ and MAPbBr₃ can directly affect the transport and collection feature of electrons, thereby governing the performance of the photovoltaic device.

Key words: band alignment; XPS; MAPbBr₃; perovskite solar cell

有机无机杂化钙钛材料具有高消光系数、长载流子寿命、大载流子扩散距离等优异性能, 近年来已成为太阳电池领域备受关注的光吸收材料^[1-3]。使用有机无机杂化钙钛矿材料做光吸收层的太阳电池转化效率从 2009 年的 3.8% 已经快速升至目前的 22.1%^[4-5]。钙钛矿电池具有较高的转化效率、简单

多样的制备工艺、原材料廉价等特点, 从理论上可以提供十分廉价的发电成本^[6]。然而, 虽然钙钛矿电池在转化效率上已经取得了迅速发展, 关于电池工作机理方面的研究却远远落后。前期研究结果表明, 不同形态的 TiO₂ 对 MAPbBr₃ 电池转化效率会产生明显影响^[7-9]。因此, 研究不同形态 TiO₂ 对钙钛矿

收稿日期: 2017-08-08; 收到修改稿日期: 2017-10-06

基金项目: 四川省重点研发项目(2017GZ0052) Key Research and Development Project of Sichuan Province (2017GZ0052)

作者简介: 张 敏(1987-), 女, 科研助理. E-mail: zhangmzhm@163.com

通讯作者: 张文华, 研究员. E-mail: whzhang@caep.cn

太阳能电池转化效率的影响机制对进一步认识此类太阳能电池的工作机理显得十分必要。

光电子能谱(photoelectron spectroscopy)是一项十分有用的材料分析技术,在样品组分、化学态、表面态、电子结构等方面有着广泛的应用^[10]。对固体材料的电子结构测试常用方法有紫外光电子能谱(UPS)以及 X 射线光电子能谱(XPS)。相对于 UPS, XPS 具有更大的探测深度,因而对制样要求较低,且更加适用于固态样品体相性质的测量;同时, XPS 可以实现原子芯电子能级和材料价带谱在同一设备上完成测量,这也是 UPS 无法实现的。在有机无机杂化钙钛矿材料的研究过程中,研究人员发现使用 XPS 测试 MAPbI₃ 价带谱结构比 UPS 得到的结果更为准确^[11-12],其根本原因归结于 XPS 对制样过程要求较低以及对表面状态的相对不灵敏性。结合以上分析,本实验拟采用更适合研究钙钛矿材料能级结构的 XPS 对 TiO₂ 与钙钛矿接触之后的能级位置关系进行测试,为进一步认识光生电子在 MAPbBr₃/TiO₂ 界面的传输过程提供实验支持。

本实验首先使用旋涂工艺制备不同形貌的 TiO₂ 基底,而后通过优化反溶剂室温结晶的方法在 TiO₂ 衬底上制备均匀连续的 MAPbBr₃ 超薄膜(Super-thin layer),进一步使用 XPS 详细研究不同形态的 TiO₂ 与 MAPbBr₃ 接触前后的能级位置关系。

1 实验方法

1.1 实验试剂

实验所用的 TiO₂(18NR-T)浆料购自澳大利亚 Dyesol 公司;溴化铅(PbBr₂)、甲氨基溴(MABr)、Spiro-MeOTAD 等购自 lumtec 公司;盐酸、四异丙醇钛(99.99%)、乙醇、氯苯、N, N-二甲基甲酰胺(DMF)、二甲基亚砜(DMSO)、松油醇、乙腈、4-叔丁基吡啶、双三氟甲烷磺酰亚胺锂等购自 Sigma-Aldrich 公司。

1.2 溶液配制

1.2.1 MAPbBr₃ 钙钛矿溶液配制

MABr 和 PbBr₂ 按摩尔比 1:1 加入到 DMF 与 DMSO 的混合溶液中(DMF: DMSO = 7:3, 体积比)配制摩尔浓度为 0.25 mol/L、0.5 mol/L 和 1.2 mol/L 的前驱溶液。将配置的溶液在室温下搅拌 12 h 后使用 0.2 μm 的 PTFE 滤芯过滤备用。

1.2.2 致密 TiO₂(cp TiO₂)溶液配制

将 369 μL 四异丙醇钛加入 2.53 mL 乙醇溶液中配制前驱溶液 A; 将 35 μL 浓度为 2 mol/L 的盐酸水溶液加入 2.53 mL 乙醇溶液中配制前驱溶液 B; 将 B

溶液在强力搅拌的条件下逐滴加入 A 溶液中,室温条件下搅拌 2 h 后使用 0.2 μm 的 PTFE 滤芯过滤备用。

1.2.3 多孔 TiO₂(mp TiO₂)溶液的配制

将 18NR-T 与松油醇、乙醇按质量比 1:3:1.5 混合,而后室温条件下搅拌 48 h 后使用 0.45 μm 的 PTFE 滤芯过滤备用。

1.3 样品及电池制备

1.3.1 玻璃清洗

方块电阻 ~7 Ω/□的 FTO 玻璃分别使用去离子水、丙酮、乙醇超声清洗,而后使用氮气枪吹干。

1.3.2 cp TiO₂ 制备

取 20 μL 所配制的 cp TiO₂ 溶液滴在 FTO 基底上,在 2000 r/min 下旋涂 20 s 后转移至马弗炉中在 500℃下退火 30 min。

1.3.3 mp TiO₂ 制备

将制得的 cp TiO₂ 冷却至室温,而后将 20 μL mp TiO₂ 溶液滴在 cp TiO₂ 上,5000 r/min 下旋涂 30 s 后并置于 120℃热台上干燥,最后转移至马弗炉中在 500℃下退火 30 min。

1.3.4 FTO 上制备较厚的 MAPbBr₃ 薄膜钙钛矿材料

取 20 μL 1.2 mol/L 的 MAPbBr₃ 溶液并滴在 FTO 表面,在 1000 r/min 下旋涂 10 s,4000 r/min 下旋涂 40 s。在第二步结束前 10 s 滴加 60 μL 氯苯溶液即可得到 MAPbBr₃ 薄膜,薄膜厚度~500 nm。

1.3.5 cp TiO₂ 上制备超薄 MAPbBr₃ 钙钛矿材料

使用 0.25 mol/L 的 MAPbBr₃ 溶液制备,实验步骤同 FTO 上制备较厚的 MAPbBr₃ 薄膜钙钛矿材料。

1.3.6 mp TiO₂ 上制备超薄 MAPbBr₃ 钙钛矿材料

使用 0.5 mol/L 的 MAPbBr₃ 溶液制备,实验步骤同 FTO 上制备较厚的 MAPbBr₃ 薄膜钙钛矿材料。由于 TiO₂ 与 MAPbBr₃ 溶液之间具有良好的浸润性,因而 MAPbBr₃ 钙钛矿材料可以均匀填充至介孔内部。

电池器件制作详细步骤参考文献[9]。

1.4 测试表征

采用 FEI 公司 Quanta 600 FEG 扫描电镜(SEM)进行表面形貌分析,加速电压为 5 kV。XPS 测试采用 Al Kα 作为激发源(50 W),光电子能谱使用 C_{1s} = 284.8 eV 校正样品表面荷电(Al Kα 激发源通常存在 ±0.05 eV 误差)。电池 J-V 曲线在 AM 1.5G 下测试,光强为 100 mW/cm² (150 W, Sol2ATM, Oriel),数据使用 Keithley 2400 源表记录。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌

图 1 给出了各个样品的 SEM 照片。为了表征

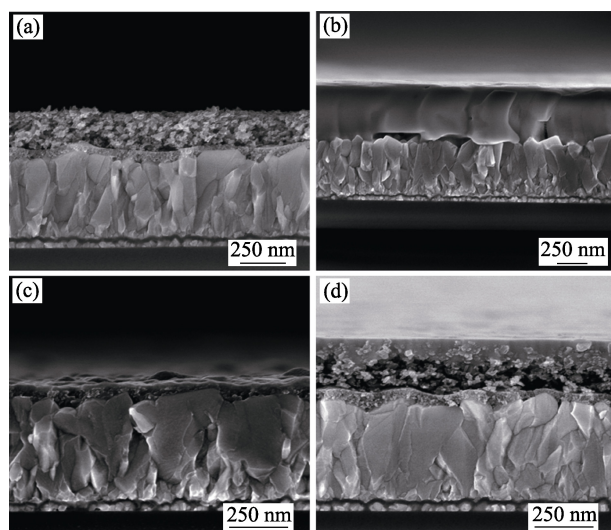


图1 (a) TiO_2 , (b) $\text{MAPbBr}_3/\text{FTO}$, (c)致密 TiO_2 上沉积超薄 MAPbBr_3 以及(d)介孔 TiO_2 上沉积超薄 MAPbBr_3 的 SEM 截面照片

Fig. 1 SEM images for (a) TiO_2 , (b) MAPbBr_3 on FTO, (c) super thin MAPbBr_3 on cp TiO_2 and (d) super thin MAPbBr_3 on mp TiO_2

TiO_2 以及 MAPbBr_3 在接触之前的能级结构, 首先在 FTO 基底上制备了较厚的 TiO_2 以及 MAPbBr_3 薄膜(图 1(a), (b))。如图 1(a)所示, 介孔 TiO_2 (mp TiO_2) 样品包含厚度为~60 nm 的致密 TiO_2 层(cp TiO_2) 以及厚度为~220 nm 的介孔层, 整个薄膜均匀、平整地沉积在 FTO 基底上。对于本文所使用的 cp TiO_2 则为省去介孔层沉积的样品。图 1(b)给出了在 FTO 基底上使用反溶剂室温结晶法沉积的 MAPbBr_3 , 由于所采用的前驱溶液浓度为 1.2 mol/L, 故可得较厚的(~500 nm) 薄膜。通过 SEM 截面分析可以看出, MAPbBr_3 薄膜十分均匀、致密, 并 100% 覆盖 FTO; 不过在与 FTO 接触的位置有少量的孔洞出现, 猜测可能是前驱溶液与 FTO 的浸润性不太理想的缘故造成的。在太阳能电池中, 不同材料之间的接触界面是影响光生载流子收集与传输的核心部位, 因而研究清楚界面处能级结构就显得十分关键。如前面分析, 虽然 XPS 可以探测相对于 UPS 更深的样品信息, 但仍属表面敏感的测试方法; 为了获取 MAPbBr_3 与 TiO_2 接触之后 TiO_2 的相关信息, 我们必须在 TiO_2 上制备能够被所使用 X 射线穿透的超薄 MAPbBr_3 薄膜。通过优化前驱溶液的浓度, 使用浓度为 0.25 和 0.5 mol/L 的前驱溶液可以在 cp TiO_2 以及 mp TiO_2 上制备厚度约几纳米的 MAPbBr_3 超薄膜(图 1(c), (d))。如图 1(c) 和(d)所示, 成功制备了 MAPbBr_3 , 均匀覆盖在不同形貌的 TiO_2 表面。图 1(d)中介孔结构 TiO_2 与 MAPbBr_3 前驱溶液之间的浸润性良好, 因此得到了在介孔结构中填充良好且表面覆盖均匀的 MAPbBr_3 超

薄膜。综上, 通过对制备工艺的优化, 分别制备了 cp TiO_2 、mp TiO_2 、 MAPbBr_3 以及在不同结构 TiO_2 表面沉积有超薄 MAPbBr_3 的样品。

2.2 光电子能谱

实验分别对 cp TiO_2 、mp TiO_2 、 MAPbBr_3 以及在 cp TiO_2 、mp TiO_2 基底上沉积 MAPbBr_3 超薄膜的五个样品进行了 XPS 光电子能谱和价带谱表征, 相关结果见图 2 (XPS 光电子能谱使用 $\text{C}1\text{s} = 284.8 \text{ eV}$ 校正样品表面荷电)。通过价带谱表征, 很容易确定价带顶(VBM)相对费米能级(E_f)的位置关系; 然而, 在一个材料中 E_f 会随掺杂、光照、偏压等能够引起电子浓度变化的因素而发生改变, 并不是理想的参照坐标。而原子芯电子能级不随外界因素变化而变化, 是理想的参照坐标候选。因而, 计算出 VBM 与原子芯电子能级的差值对进一步表征 MAPbBr_3 与 TiO_2 接触之后的能级位置关系十分重要。图 2(a)给出了 cp TiO_2 的 $\text{Ti}2\text{p}$ XPS 能谱以及价带谱信息, 出现在 464.29 eV 以及 458.75 eV 的双峰分别对应 $\text{Ti}2\text{p}_{1/2}$ 以及 $\text{Ti}2\text{p}_{3/2}$ 的轨道能级, 表明 Ti 处于 +4 价态。通过对价带谱的拟合得到 cp TiO_2 的 VBM 与 E_f 之间的差值为 2.73 eV, 进而得到 VBM 相对于 $\text{Ti}2\text{p}_{3/2}$ 能级的差值为 456.02 eV。同样的表征以及计算方法可以得出 mp TiO_2 的 VBM 相对于 $\text{Ti}2\text{p}_{3/2}$ 能级的差值为 456.27 eV(图 2(b))。由此可见, TiO_2 的形貌结构会对 VBM 相对芯电子能级的位置关系造成直接的影响。图 2(c)给出了 MAPbBr_3 薄膜的能级结构信息; 出现在 142.67 eV 以及 137.81 eV 的双峰分别对应 $\text{Pb}4\text{p}_{5/2}$ 以及 $\text{Pb}4\text{p}_{7/2}$ 轨道能级^[13-15]。同样以拟合及计算方法可以得到 MAPbBr_3 的 VBM 相对于 $\text{Pb}4\text{f}_{7/2}$ 能级的差异为 137.12 eV。为了进一步表征 MAPbBr_3 与 TiO_2 接触之后的能级位置关系, 对 cp TiO_2 以及 mp TiO_2 上沉积超薄 MAPbBr_3 样品的光电子能谱进行 XPS 表征, 计算后可以得到 MAPbBr_3 与 cp TiO_2 、mp TiO_2 接触之后 $\text{Ti}2\text{p}_{3/2}$ 与 $\text{Pb}4\text{f}_{7/2}$ 芯电子能级之间的差值分别为 320.42 eV 和 320.38 eV。通过对 cp TiO_2 以及 mp TiO_2 上沉积超薄 MAPbBr_3 样品的表征, 成功阐明了沟通 TiO_2 与 MAPbBr_3 能级结构之间的关系。

2.3 能级位置关系

通过图 2 中得到的测试结果, 对 $\text{MAPbBr}_3/\text{TiO}_2$ 接触之后所形成的异质结能级位置关系进行了进一步分析。图 3(a)和(b)分别给出了 cp TiO_2 与 MAPbBr_3 以及 mp TiO_2 与 MAPbBr_3 接触之后的能级位置关系。cp TiO_2 电子传输层中 TiO_2 价带与 MAPbBr_3 价带差异为 1.52 eV, 考虑到 TiO_2 与 MAPbBr_3 禁带宽度分别为 3.20 eV 和 2.31 eV, 可以推算出 MAPbBr_3

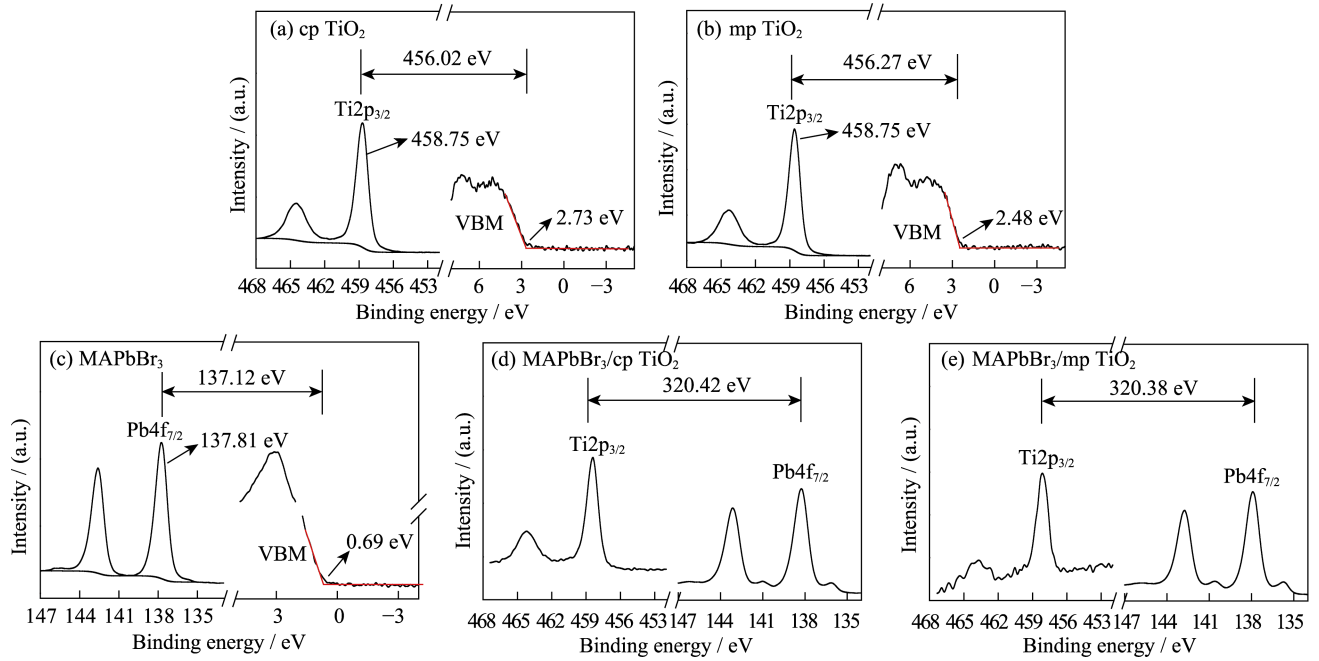


图 2 (a) cp TiO₂、(b) mp TiO₂、(c) MAPbBr₃、(d) cp TiO₂ 上沉积超薄 MAPbBr₃ 和(e) mp TiO₂ 上沉积超薄 MAPbBr₃ 样品的光电子能谱图

Fig. 2 XPS spectra for (a) cp TiO₂, (b) mp TiO₂, (c) MAPbBr₃, (d) thin MAPbBr₃ on cp TiO₂ and (e) thin MAPbBr₃ on mp TiO₂

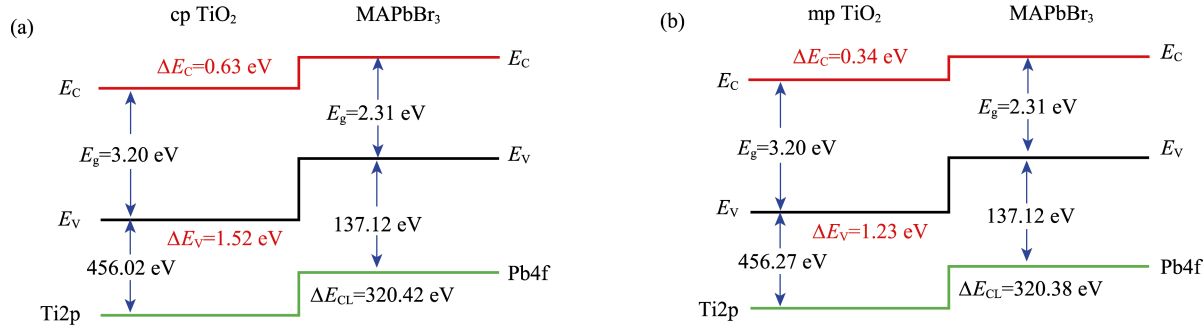


图 3 MAPbBr₃/TiO₂ 异质结的能级位置关系

Fig. 3 Energy band diagram of MAPbBr₃/TiO₂ heterointerface obtained from XPS measurements

与 cp TiO₂ 接触之后导带差为 0.63 eV。同理计算出 MAPbBr₃ 与 mp TiO₂ 接触之后导带差异为 0.34 eV, 相比于 cp TiO₂ 导带差异下降~0.3 eV。因而, TiO₂ 材料的不同形貌结构对其电子结构存在一定的影响, 进而影响 TiO₂/MAPbBr₃ 异质结界面的能级位置关系。

2.4 太阳能电池性能

本课题组分别使用 cp TiO₂、mp TiO₂ 作为电子传输层制备了完整的钙钛矿电池, 相关 *J-V* 曲线以及电池性能参数分别在图 4 和表 1 中给出。使用不同形貌的 TiO₂ 对器件的性能有着重大的影响, 使用 cp TiO₂ 做电子传输层的电池开路电压(*V*_{oc})、短路电流密度(*J*_{sc})、填充因子(*FF*)以及转化效率(*η*)分别为 0.91 V、0.34 mA/cm²、61.41% 以及

表 1 基于不同电子传输层的 MAPbBr₃ 钙钛矿电池光伏性能参数

Table 1 Photovoltaic parameters of MAPbBr₃ solar cells with different electron transport layers

Sample	<i>V</i> _{oc} /V	<i>J</i> _{sc} /(mA·cm ⁻²)	<i>FF</i> /%	<i>η</i> /%
cp TiO ₂	0.91	0.34	61.41	0.19
mp TiO ₂	1.39	7.13	75.88	7.52

0.19%; 较低的短路电流密度意味着不能有效地收集光生电子, 进而严重影响了器件的转化效率。作为对比, 使用 mp TiO₂ 的电池器件得到了比较好的光电转化能力, *V*_{oc}、*J*_{sc} 以及 *FF* 分别为 1.39 V、7.13 mA/cm² 和 75.88%, 最终得到了 7.52% 的转化效率。对比二者的器件结构, 唯一的不同就是 mp TiO₂ 层, 因而 mp TiO₂ 是改善光生电子收集效率的

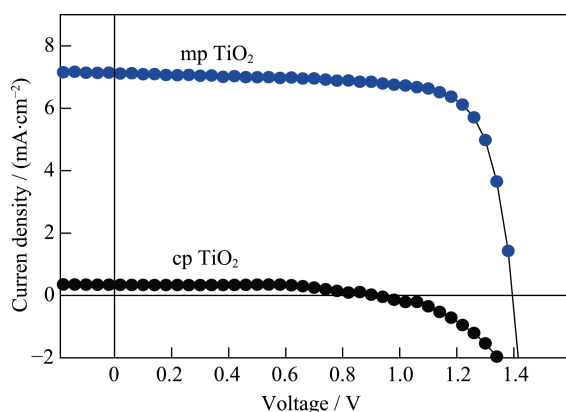


图4 基于不同电子传输层的太阳电池器件性能

Fig. 4 Performance of the solar cells based on different electron transport layers

关键。 mp TiO_2 在与 MAPbBr_3 接触后的导带差为 0.34 eV , 小于 cp TiO_2 与 MAPbBr_3 接触后的导带差 (0.63 eV); 电荷在不同材料间定向传输需要一定的能级差, 通常认为 $0.2\sim 0.3 \text{ eV}$ 可以产生足够大的电子转移驱动力。过大的能级差由于接触界面能带弯曲而引入类似肖特基结的电荷传输势垒, 反而不利于电荷传输。基于以上实验结果可知, 合适的导带能级差异是促进电子由 MAPbBr_3 向 TiO_2 高效传递的重要原因。

3 结论

使用旋涂和反溶剂室温结晶的方法分别制备了具有不同形貌的 TiO_2 薄膜和 MAPbBr_3 钙钛矿薄膜。通过控制 MAPbBr_3 前驱溶液的浓度, 可以在 FTO、 cp TiO_2 和 mp TiO_2 基底上制备厚度可控、致密均匀的钙钛矿薄膜。XPS 测试结果表明, cp TiO_2 与 mp TiO_2 具有不同的能级结构; 不同于 mp TiO_2 , cp TiO_2 与 MAPbBr_3 产生的导带差值过大, 不利于光生电子的收集与传输。基于 cp TiO_2 为电子传输层的 MAPbBr_3 电池的转化效率远低于 mp TiO_2 为电子传输层的电池的转化效率。本实验表明, 合适的能级位置关系对电池器件起着至关重要的作用, 相关结果可以为以后太阳电池器件设计提供材料选取、结构优化等重要参考。

参考文献:

- [1] GREEN MARTIN A, HO-BAILLIE ANITA, SNAITH HENRY J. The emergence of perovskite solar cells. *Nat. Photon.*, 2014, **8**(7): 506–514.
- [2] JEON NAM JOONG, NOH JUN HONG, KIM YOUNG CHAN, *et al.* Solvent engineering for high-performance inorganic–organic hybrid perovskite solar cells. *Nat. Mater.*, 2014, **13**(9): 897–903.
- [3] MCMEEKIN DAVID P, SADOUGHI GOLNAZ, REHMAN WAQAAS, *et al.* A mixed-cation lead mixed-halide perovskite absorber for tandem solar cells. *Science*, 2016, **351**(6269): 151–155.
- [4] KOJIMA AKIHIRO, TESHIMA KENJIRO, SHIRAI YASUO, *et al.* Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, **131**(17): 6050–6051.
- [5] YANG WOON SEOK, NOH JUN HONG, JEON NAM JOONG, *et al.* High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 2015, **348**(6240): 1234–1237.
- [6] CAI M, WU Y, CHEN H, *et al.* Cost-performance analysis of perovskite solar modules. *Adv. Sci.*, 2017, **4**(1): 1600269.
- [7] HANUSCH FABIAN C, WIESENMEYER ERWIN, MANKEL ERIC, *et al.* Efficient planar heterojunction perovskite solar cells based on formamidinium lead bromide. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2014, **5**(16): 2791–2795.
- [8] ZHENG XIAOJIA, CHEN BO, YANG MENGJIN, *et al.* The controlling mechanism for potential loss in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ hybrid solar cells. *ACS Energy Lett.*, 2016, **1**(2): 424–430.
- [9] ZHENG XIAOJIA, CHEN BO, WU CONGCONG, *et al.* Room temperature fabrication of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ by anti-solvent assisted crystallization approach for perovskite solar cells with fast response and small J - V hysteresis. *Nano Energy*, 2015, **17**: 269–278.
- [10] JIN LINXUN, WANG DIANXUN, HUANG LIANGBAO, XPS spectra of the inner shell and the valence band of some crown ethers. *Chinese J. Org. Chem.*, 1986(**06**): 439–442.
- [11] CONINGS BERT, BAETEN LINNY, DE DOBBELAERE CHRISTOPHER, *et al.* Perovskite-based hybrid solar cells exceeding 10% efficiency with high reproducibility using a thin film sandwich approach. *Adv. Mater.*, 2014, **26**(13): 2041–2046.
- [12] MILLER ELISA M, ZHAO YIXIN, MERCADO CANDY C, *et al.* Substrate-controlled band positions in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite films. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, **16**(40): 22122–22130.
- [13] LINDBLAD REBECCA, JENA NARESH K, PHILIPPE BERTRAND, *et al.* Electronic structure of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ perovskites: dependence on the halide moiety. *J. Phys. Chem. C*, 2015, **119**(4): 1818–1825.
- [14] ENDRES JAMES, KULBAK MICHAEL, ZHAO LIANFENG, *et al.* Electronic structure of the CsPbBr_3 /polytriarylamine (PTAA) system. *J. Appl. Phys.*, 2017, **121**(3): 035304.
- [15] LIU XIAOLIANG, WANG CHENGONG, LYU LU, *et al.* Electronic structures at the interface between Au and $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015, **17**(2): 896–902.

我与严东生先生



1997 年我考入中国科学院上海硅酸盐研究所, 成为严先生的一名博士研究生。初次见严先生讨论课题时不免有些紧张。然而, 先生的慈祥、宽厚、循循善诱而又充满鼓励的交谈就使我很快放下心来, 没有任何负担地进入课题的讨论。虽然先生当时已近 80 岁的高龄, 但对文献的理解具有极好的广度和深度, 对课题的分析十分透彻。此后每隔一段时间向严先生进行课题汇报与工作进展讨论, 严先生总是平易近人。作为学生的我, 完全能够以平等的方式和严先生进行探讨, 充分表达自己的观点; 我对博士期间第一篇论文的修改至今印象深刻: 严先生对论文整体结构、上下文的逻辑关系、英语语法的运用, 乃至标点符号等方面的建议和修改都非常全面。

严先生虽然已经驾鹤仙逝, 但严先生平易近人、虚怀若谷、做事一丝不苟并严格要求的品格使我受益终生。

张文华