

纳米 TiO_2 的合成及其在 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池中的应用研究

徐 源¹, 李甜甜², 张开拓³, 王国海¹

(1. 河南工学院 材料科学与工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南工学院 工程技术教学部, 河南 新乡 453003;
3. 河南省线缆结构与材料重点实验室, 河南 新乡 453003)

摘要: TiO_2 作为钙钛矿太阳能电池的电子传输材料, 其合成和应用对钙钛矿太阳能电池性能的提高具有重要意义。使用环己烷作为有机溶剂, 油胺和油酸作为有机配体, 通过溶剂热的方法合成具有配体包裹的纳米 TiO_2 。通过 XRD 分析纳米 TiO_2 的晶体结构, 通过 TEM 观测微观形貌, 通过德拜-谢乐公式计算晶粒的尺寸, 通过紫外可见分光光度计测量纳米 TiO_2 的光谱吸收和光学带隙, 组装了基于纳米 TiO_2 为 ETL 的碳基 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池, 探索了纳米 TiO_2 的浓度对电池光电性能和稳定性的影响。结果表明, 通过溶剂热合成的纳米 TiO_2 为锐钛矿结构, 其粒径为 3 nm 符合正态分布, 其光学带隙为 3.37 eV。当 TiO_2 浓度为 50 mg mL^{-1} 时表现出最佳的光电性能和环境稳定性。

关键词: TiO_2 ; 溶剂热; 太阳能电池; 钙钛矿

中图分类号: TN36

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2025)02-0029-06

0 引言

有机无机卤化物钙钛矿材料具优良的载流子迁移率、可调的带隙、较大的吸收系数和易于制备等优点, 被誉为下一代最有潜力的光电材料^[1-5]。在过去的十多年时间里, 有机无机卤化物钙钛矿太阳能电池的单节光电转换效率 (Power Conversion Efficiency, PCE) 从 2009 年的 3.8% 迅速飙升至 26.81%^[6-8], 但材料中的甲胺和甲脒离子导致电池热稳定性和环境耐受性差。研究发现, 通过封装技术、界面工程和杂质工程等钙钛矿晶体中引入 Cs^+ 取代有机阳离子, 是简单有效改善钙钛矿太阳能电池的环境耐受性, 尤其是热稳定性的策略^[9]。

全无机钙钛矿 CsPbX_3 ($\text{X}=\text{I}, \text{Br}, \text{Cl}$) 吸引了较多科研工作者加以研究^[10-13]。 CsPbI_3 钙钛矿拥有 1.73 eV 的带隙, 在该体系中具有最高的 PCE。然而, α 相 (黑相) 的 CsPbI_3 钙钛矿材料在 330 $^\circ\text{C}$ 以上才能保持稳定结构, 在室温环境中会很快从 α 相 (黑相) 转变为光电性能极差的 β 相 (黄相)。 CsPbX_3 钙钛矿体系

中, CsPbBr_3 具有优异的湿热稳定性, 但是 CsPbBr_3 钙钛矿具有 2.3 eV 的宽带隙, 使吸收边缘在 540 nm 附近严重影响了钙钛矿对太阳光光谱的吸收。研究表明通过混合 Br 和 I 离子可以平衡 CsPbX_3 钙钛矿的带隙和稳定性, 当 Br 和 I 离子的比例为 2 : 1 时, CsPbIBr_2 表现出 1.90 eV 适宜的带隙和满意的稳定性。此外, CsPbIBr_2 钙钛矿呈现出深红色和半透明的状态, 在车窗或建筑玻璃有潜在的应用价值, 也可用作叠层电池的顶端。

尽管 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池的 PCE 不断提高, 然而与肖克利-奎伊瑟 (S-Q) 极限效率具有较大的差距。研究表明电池的缺陷态密度、非辐射复合和能级对齐问题是造成 PCE 低和电池性能差的主要原因。Wang 等人引入 SmBr_3 作为电子传输层 (Electron Transport Layer, ETL) 构建梯度能带, 不仅可以有效抑制界面电荷复合, 还能有效抑制钙钛矿内部的非辐射复合, 使 CsPbIBr_2 钙钛矿效率提高到 10.88%^[14]。Ma 的团队提出一种 ETL 钝化策略, 在 ETL 上面引入 SnCl_2 钝化层。经过优化后的实验组可以抑制钙钛矿和

收稿日期: 2024-06-15

基金项目: 河南工学院博士科研启动基金 KQ2424; 河南省高等学校重点科研项目 (25B510018)

第一作者简介: 徐源 (1993 —), 男, 河南鹤壁人, 讲师, 博士, 主要从事纳米功能材料的设计、合成和应用研究。

ETL 之间的非辐射复合, 获得单节太阳能电池 1.31 V 的高开路电压^[15]。在之前的工作中, 我们通过 Cd 元素的痕量掺杂减少了 CsPbIBr₂ 钙钛矿电池的缺陷态密度, 抑制了非辐射复合, 提高了光电转换效率和稳定性^[16]。

目前, 钙钛矿太阳能电池的 ETL 通常是由带隙较大的 ZnO、SnO₂ 和 TiO₂ 等氧化物半导体构成, 这类材料具有较低的 HOMO 能级, 可以有效阻挡空穴传输, 抑制载流子复合。此外, 氧化物通常具有较高的稳定化学结构, 并且可以通过旋涂、化学沉积和真空蒸镀等方式形成致密的薄膜。最重要的是这些氧化物材料资源丰富、价格低廉。根据美国国家可再生能源实验室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 公布的认证效率, TiO₂ 材料作为 ETL 的钙钛矿太阳能电池具有最高的使用频率, 这主要归于 TiO₂ ETL 具有更深的导带和更匹配的能级结构, 因此吸引了较多科研工作者的关注。主流的 TiO₂ ETL 通常不能完整地覆盖在 FTO 玻璃表面, 导致 TiO₂ ETL 与钙钛矿薄膜之间的界面接触较差, 从而成为电池中载流子的复合中心, 特别是在热场、电场和应力场等环境中, 更容易使电池发生不可逆的化学分解。

我们通过溶剂热合成的方法, 制备出具有有机配体包裹的纳米氧化钛晶体 (TiO₂ NCs)。通过旋涂的方法将 TiO₂ NCs 制备到 FTO 玻璃上用作 CsPbIBr₂ 钙钛矿太阳能电池的 ETL, 通过改变 TiO₂ NCs 的浓度, 研究 TiO₂ NCs 的浓度对光电性和稳定性的影响。

1 纳米 TiO₂ 的合成

纳米 TiO₂ 的合成流程图如图 1。首先取 7 mL 油酸和 20 mL 环己烷加入锥形瓶, 用磁力搅拌器充分搅拌。取适量钛酸四丁酯滴入混合溶剂的锥形瓶中并搅拌。在溶液中滴加油胺并充分搅拌, 随后将温度升高至 70 °C, 同时持续搅拌 30 min。搅拌结束后, 将混合溶剂加入反应釜, 置于 180 °C 的烘箱保温 24 h, 再自然冷却至室温取出, 加入约 3 倍体积乙醇后, 有白色沉淀产生, 静置、离心后留取白色沉淀。取适量白色沉淀加入甲苯, 经超声分散得到不同浓度的 TiO₂ 胶体。所有试剂均购买于阿拉丁化学试剂 (AR 级), 使用前均未做处理。

2 纳米 TiO₂ 的结构与表征

2.1 TiO₂ 晶体结构分析

图 2 为 TiO₂ NCs 的 X 射线衍射仪 (XRD) 图谱, 在 TiO₂ 衍射峰中 (101) 具有最强的衍射峰。图谱中

(103)、(004) 和 (102) 衍射峰相互重叠, (105) 和 (221) 衍射峰重叠, 经过与 PDF 卡片 (#21-1272) 对比, 可以清晰地看出 TiO₂ NCs 为锐钛矿结构, 并且衍射峰中没有出现其他杂峰, 表明通过水热合成的 TiO₂ NCs 具有较高的结晶度和纯度。



图 1 纳米 TiO₂ 合成流程图

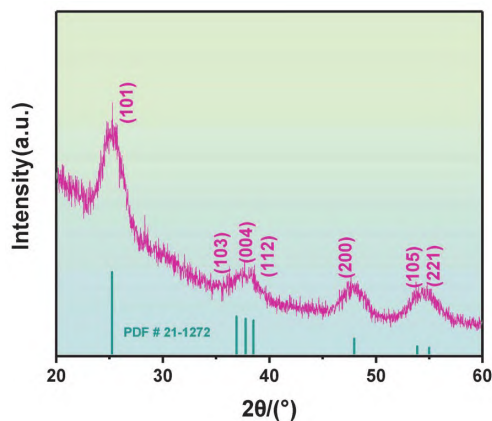


图 2 纳米 TiO₂ 的 XRD 图谱

2.2 TiO₂ 微观结构分析

图 3(a) 给出了 TiO₂ NCs 的透射电子显微镜 (TEM) 照片, 照片中可以看出 TiO₂ NCs 均匀分散在碳膜上, 没有出现团聚现象。一般而言, 纳米材料通常会出现较大的团聚, 当使用旋涂的方法制备薄膜时, 势必会导致薄膜厚度不一致。对于钙钛矿太阳能电池的 ETL, 会导致界面处载流子堆积, 非辐射复合严重, 不利器性能提高。对于本次合成的 TiO₂ NCs, 是通过水热法制备, 在 TiO₂ NCs 周围包裹一层油酸油胺薄膜, 从而使 TiO₂ NCs 更好地分散到溶剂中, 减少了团聚产生。图 3(b) 为 TiO₂ NCs 的晶粒尺寸分布范围, 从中可以清晰地看出, TiO₂ NCs 的晶体尺寸分布在 1.8—4.2 nm 之间。通过使用 Digital Micrograph 软件对 TiO₂ NCs

进行粒径统计, 从粒径统计图中可以看出, 晶粒尺寸分布中间高, 两边低且呈对称状的正态分布趋势, 并且晶粒尺寸的分布集中在 3 nm。为了进一步分析 TiO₂ NCs 的尺寸, 通过德拜-谢乐公式计算其粒径大小, 德拜-谢乐公式如式 (1):

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

其中: D 为晶粒尺寸, K 为 Scherrer 常数, β 为射线波长, λ 为 X 射线波长, θ 为衍射角。

通过 Lorentz 函数进行拟合, 并通过式 (1) 计算出 TiO₂ NCs 的晶粒尺寸为 2.78 nm。

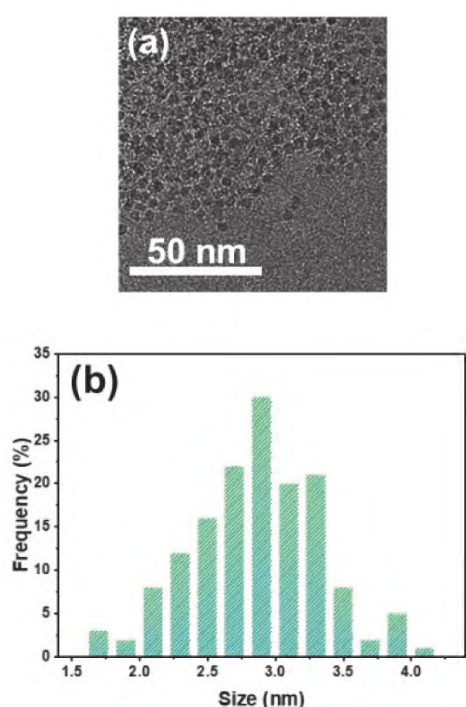


图 3 TiO₂ NCs 的 (a) TEM 照片; (b) 尺寸分布

2.3 TiO₂ 光学性能分析

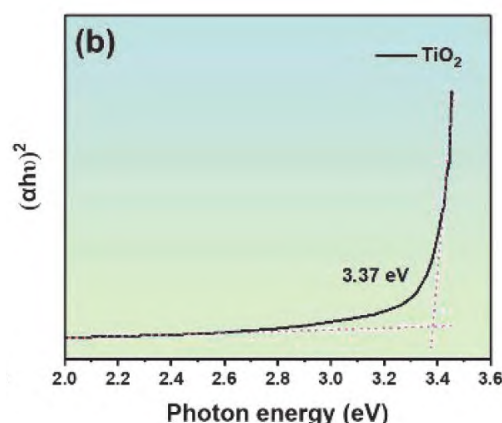
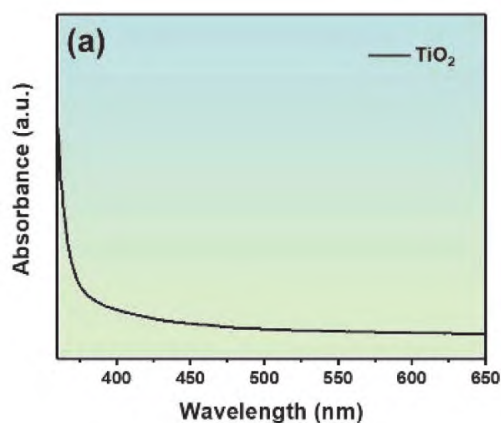


图 4 TiO₂ 的 (a) 紫外可见吸收光谱; (b) 光学带隙图

图 4 (a) 给出了 TiO₂ NCs 分散在氯苯中的紫外可见吸收光谱, 从中可以清晰的看出 TiO₂ NCs 在紫外和紫外光部分表现出较强的吸收。根据 Tauc Plot 法计算 TiO₂ 的禁带宽度, 如式 (2):

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \approx \frac{1240}{\lambda} \quad (2)$$

在式 (2) 中: h 普朗克常量, c 光在真空中的速度, λ 射线波长, ν 光的频率。

计算结果如图 4 (b) 所示, 通过水热合成的纳米 TiO₂ 的带隙为 3.37 eV, 和 TiO₂ 带隙较一致。

3 电池组装与性能测试

3.1 CsPbIBr₂ 钙钛矿太阳能电池组装

本工作所采用的是掺杂氟的 SnO₂ 导电玻璃 (Fluorine-doped Tin Oxide, FTO), 将 FTO 依次使用丙酮、异丙醇、无水乙醇和去离子水在超声波清洗机中清洗 20 min, 清洗结束后将 FTO 通过玻璃皿转移至高温烘箱去除残余有机溶剂和水分, 待完全干燥后取出。将上述合成的 TiO₂ NCs 分散到氯苯中, 得到稳定的 TiO₂ NCs 胶体。控制 TiO₂ NCs 的浓度, 分别得到 30 mg mL⁻¹、40 mg mL⁻¹、50 mg mL⁻¹ 和 60 mg mL⁻¹ 的 TiO₂ NCs 胶体。将制备好的 TiO₂ NCs 胶体平铺在 FTO 上, 随后放入马弗炉中退火, 500 °C 下保温 30 min。称取 183.5 mg PbBr₂ (0.5 M)、230.5 mg PbI₂ (0.5 M) 和 212.8 mg CsBr (1.0 M) 的药品加入 3 mL 的小瓶子, 再加入 1 mL 的二甲基亚砜 (Dimethyl Sulfoxide, DMSO) 溶剂, 密封搅拌至完全溶解。移液枪吸取适量钙钛矿前驱体均匀铺展在具有 TiO₂ 的 ETL 上。然后置于 35 °C 的加热台预退火 3—5 min, 随后置于 160 °C 的热台上退火 10 min, 形成 CsPbIBr₂ 钙钛矿薄膜, 操作流程如图 5 所示。

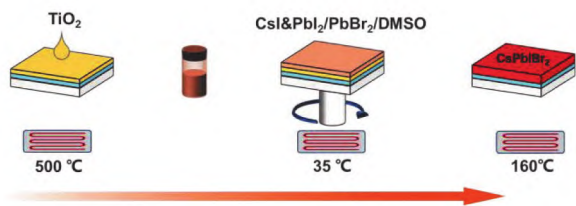


图5 CsPbIBr₂ 钙钛矿太阳能电池器件组装流程图

3.2 CsPbIBr₂ 钙钛矿晶体结构分析

按照图5所示的流程在TiO₂薄膜上制备了CsPbIBr₂钙钛矿薄膜,为了分析CsPbIBr₂钙钛矿薄膜的制备情况,通过XRD测试了FTO/TiO₂/CsPbIBr₂结构下的XRD图谱,如图6所示。图6中,(100)和(200)两个晶面为CsPbIBr₂钙钛矿的最强峰,表明CsPbIBr₂钙钛矿在[100]方向上的择优生长取向和优异的结晶性,这与Lan等人的报道一致^[17]。然而在XRD图谱中并没有观测到TiO₂的衍射峰,主要原因是CsPbIBr₂钙钛矿直接生长在TiO₂薄膜上,CsPbIBr₂钙钛矿薄膜的厚度大概在300—400 nm,远远小于XRD的测量深度,因此在CsPbIBr₂钙钛矿薄膜表面没有测量出TiO₂薄膜的衍射峰。

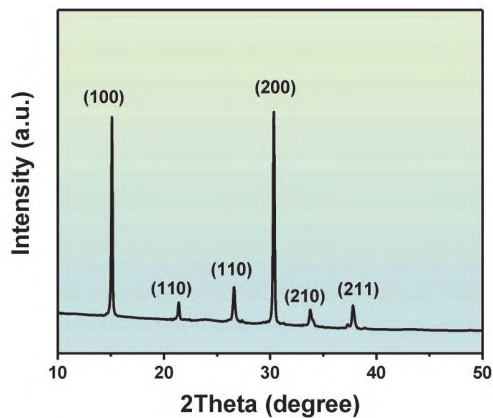


图6 CsPbIBr₂ 钙钛矿薄膜的XRD图谱

3.3 CsPbIBr₂ 钙钛矿薄膜和电池微观结构分析

为了进一步观察CsPbIBr₂钙钛矿薄膜的微观结构和形貌,通过扫描电子显微镜(SEM)观察TiO₂ NCs浓度为50 mg mL⁻¹的CsPbIBr₂钙钛矿薄膜的显微照片和CsPbIBr₂钙钛矿太阳能电池的横截面照片,如图7所示。在图7(a)中,可以清晰地看出钙钛矿薄膜表面晶粒饱满且圆润,晶体表面平整,没有出现孔洞和缝隙等缺陷。图7(b)给出了钙钛矿太阳能电池的横截面显微照片。从照片中可以清晰地看出TiO₂ NCs完整覆盖在FTO表面,其厚度约为40 nm。TiO₂ NCs是直接旋涂在FTO表面上的,因此FTO的峰和谷处

均能覆盖到。经过测量,钙钛矿薄膜的厚度约为400 nm,照片中TiO₂和钙钛矿接触较好,这主要是因为TiO₂与钙钛矿晶体结构较匹配,可以使钙钛矿较好地生长在TiO₂上。在钙钛矿薄膜上面可以看到碳电极,它主要起到提取空穴的作用。由于碳材料具有稳定的结构,因此用碳做电极有利于提高电池的稳定性。

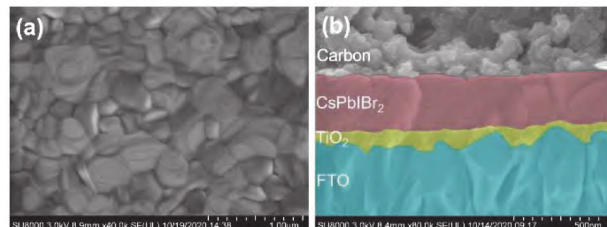


图7 SEM照片(a) CsPbIBr₂ 钙钛矿薄膜俯视照片;
(b) CsPbIBr₂ 钙钛矿电池截面照片

3.4 CsPbIBr₂ 钙钛矿电池的光电性能分析

为了研究TiO₂ NCs对CsPbIBr₂钙钛矿太阳能电池光电性能的影响,将TiO₂ NCs用作钙钛矿太阳能电池的电子传输层,并组装基于FTO/TiO₂/CsPbIBr₂/C结构的电池。通过调控TiO₂ NCs的浓度,研究TiO₂ NCs对CsPbIBr₂太阳能电池光电性能的影响。图8给出了不同TiO₂ NCs浓度下的J-V曲线。当TiO₂ NCs浓度为30 mg mL⁻¹和40 mg mL⁻¹时,其开路电压VOC、短路电流JSC、填充因子FF和PCE分别是1.19 V、11.19 mA cm⁻²、57.54%和7.867; 1.211 V、11.75 mA cm⁻²、60.76%和8.645。随着TiO₂ NCs浓度的增加,电池的光电性能逐渐提高。TiO₂ NCs浓度为50 mg mL⁻¹时PCE达到最大值9.326%,此时的开路电压VOC、短路电流JSC和填充因子FF分别是1.275 V、11.83 mA cm⁻²、61.83%。当TiO₂ NCs的浓度为60 mg mL⁻¹时,其PCE为8.039并呈现下降的趋势,开路电压VOC、短路电流JSC和填充因子FF分别是1.223 V、11.65 mA cm⁻²、56.42%。TiO₂材料作为典型的ETL,具有优异的电子提取能力。当TiO₂ NCs浓度较小时会导致TiO₂薄膜生长不均匀,或不能完全覆盖FTO表面,使ETL和钙钛矿界面出现较多的界面复合,不利于提高电池的性能。随着TiO₂ NCs浓度增加,覆盖在FTO上的TiO₂ NCs逐渐完整,界面复合逐渐被抑制,当TiO₂ NCs浓度为50 mg mL⁻¹时,其PCE达到最大值。TiO₂不仅作为电池的ETL,还起到了阻挡空穴的作用,当TiO₂ NCs浓度较大时,TiO₂ ETL薄膜变厚,不利于载流子的传输。因此TiO₂ NCs浓度为60 mg mL⁻¹时,光电性能降低。此外,较多的有机配体也会影响电池性能。由于TiO₂在合成过程中使用了油胺油酸用作TiO₂

纳米晶的有机配体, 而配体浓度的增加不利于载流子的提取, 因此导致电池光电性能降低。

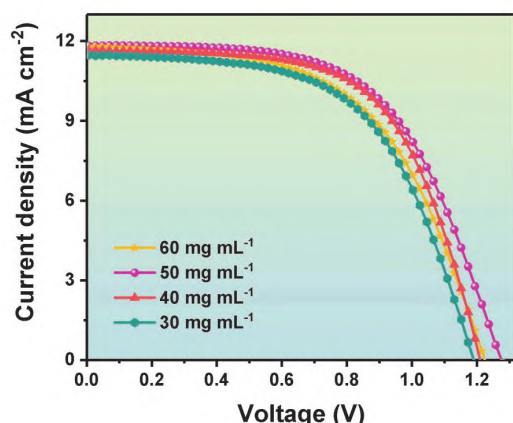


图 8 不同 TiO_2 浓度的 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池的 J-V 曲线

3.5 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池的重复性分析

图 9 给出了 TiO_2 NCs 不同浓度的 25 个独立电池 PSC 箱式统计图, 从图中可以清晰地发现所有样品均表现出狭窄的分布, 表明所有电池均具有出色的重复性。随着 TiO_2 NCs 浓度的增加, CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池的 PCE 逐渐增大, 当 TiO_2 NCs 浓度为 50 mg mL^{-1} 时太阳能电池的 PCE 达到最大值并随着 TiO_2 NCs 浓度的增加呈现下降的趋势, 和上述光电性能分析较一致, 进一步证明 TiO_2 NCs 浓度为 50 mg mL^{-1} 时是最佳浓度。

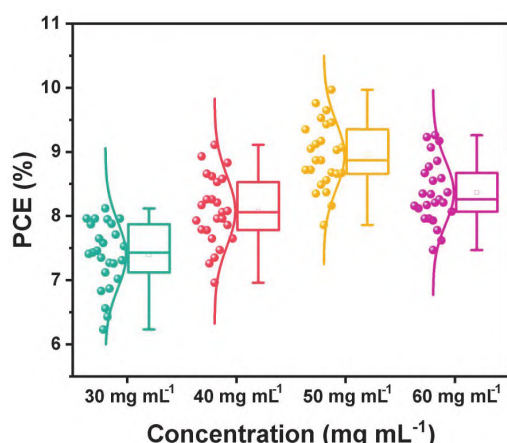


图 9 不同 TiO_2 NCs 浓度的 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池 PCE 统计图

3.6 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池的稳定性分析

钙钛矿太阳能电池中电池的环境稳定性也是评价性能的重要指标。钙钛矿晶体生长在 TiO_2 薄膜上, 而 TiO_2 薄膜的生长情况会影响钙钛矿晶体的质量。 TiO_2 薄膜如果出现较多的缺陷会导致与钙钛矿薄膜的接触差, 当电池处在电场、热场、和应力场等复杂的场中时, 会

引起电池发生不可逆的化学分解^[18-19]。为了评估钙钛矿电池的稳定性, 将 TiO_2 NCs 浓度为 50 mg mL^{-1} 时的太阳能电池在空气环境中 ($\text{RH} \approx 30\%$) 储存 800 h, 其后发现电池仍能保持初始 PCE 的 90% 以上, 如图 10 所示。

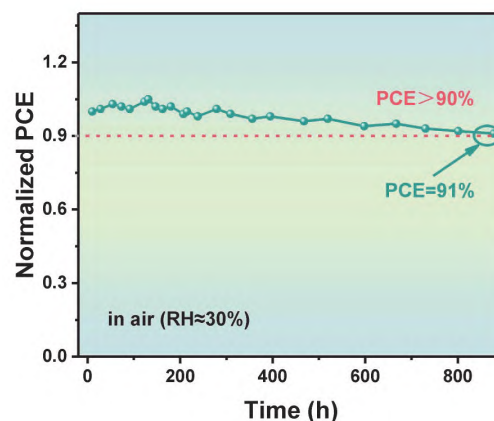


图 10 TiO_2 NCs 浓度为 50 mg mL^{-1} 的 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池稳定性

4 结论

通过溶剂热法合成具有有机配体包裹的纳米 TiO_2 , TEM 和德拜-谢乐公式计算其粒径约为 3 nm, 粒径符合正态分布。通过 Tauc Plot 法计算 TiO_2 的禁带宽度为 3.37 eV。研究了 TiO_2 NCs 浓度对 CsPbIBr_2 钙钛矿太阳能电池光电性能的影响, 发现当纳米 TiO_2 浓度为 50 mg mL^{-1} 时, 其开路电压 V_{OC} 、短路电流 J_{SC} 、填充因子 FF 和 PCE 分别是 1.275 V、11.83 mA cm^{-2} 、61.83% 和 9.326%。该电池在室温环境 ($\text{RH} \approx 30\%$) 中存放 800 h 以上仍能保留初始 PCE 的 90% 以上。该工作为 TiO_2 NCs 的合成和全钙钛矿太阳能电池的制备提供了简单有效的优化策略。

参考文献:

- [1] CORREA-BAENA J-P, SALIBA M., BUONASSISI T., et al. Promises and challenges of perovskite solar cells [J]. Science, 358, (6364) (2017) 739 - 744.
- [2] LIU M, JOHNSTON M.B, SNAITH H.J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition [J]. Nature, 501, (7467) (2013) 395 - 398.
- [3] CHEN W, WU Y, YUE Y, et al., Efficient and stable large-area perovskite solar cells with inorganic charge extraction layers [J]. Science, 350, (6263) (2015) 944 - 948.
- [4] LEE MICHAEL M, TEUSCHER J, MIYASAKA T, et al., Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructure organometal halide perovskites [J]. Science, 338, (6107) (2012) 643 - 647.
- [5] YANG WOON S, NOH JUN H, JEON NAM J., et al., High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through

- intramolecular exchange [J]. *Science*, 348, (6240) (2015) 1234 – 1237.
- [6] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, et al. Organometal halide perovskites as visible–light sensitizers for photovoltaic cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.* 131, (17) (2009) 6050 – 6051.
- [7] KIM H–S, LEE C–R, IM J–H, et al., Lead iodide perovskite sensitized all–solid–state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9% [J]. *Sci. Rep.* 2, (1) (2012) 591.
- [8] NREL. Best Research–Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies>(accessed 2024–11).
- [9] JESPER JACOBSSON T, CORREA–BAENA J, PAZOKI M, et al. Exploration of the compositional space for mixed lead halogen perovskites for high efficiency solar cells [J]. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9, (5): 1706–1724.
- [10] ZHANG W, LIU H, QI X, et al. Oxalate pushes efficiency of $\text{CsPb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{IBr}_2$ based all–inorganic perovskite solar cells to over 14% [J]. *Advanced Science*, 2022, 9, (11): 2106054.
- [11] DING Y, GUO Q, GENG Y, et al. A low–cost hole transport layer enables CsPbI_2Br single–junction and tandem perovskite solar cells with record efficiencies of 17.8% and 21.4% [J]. *Nano Today*, 2022, 46: 101586.
- [12] ZHOU Q, DUAN J, DU J, et al. Tailored lattice “Tape” to confine tensile interface for 11.08%–efficiency all–inorganic CsPbBr_3 perovskite solar cell with an ultrahigh voltage of 1.702 V [J]. *Advanced Science*, 2021, 8, (19): 2101418.
- [13] TAN S, YU B, CUI Y, et al. Temperature–reliable low–dimensional perovskites passivated black–Phase CsPbI_3 toward stable and efficient photovoltaics [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61, (23): e202201300.
- [14] WAQAS SIDDIQUE SUBHANI, K. WANG, M. DU, et al, Interface–modification–induced gradient energy band for highly efficient CsPbIBr_2 perovskite solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.* 9, (21) (2019)1803785.
- [15] GUO Z, SIOUHWANG T, XU Z, et al, Achievable high V_{oc} of carbon based all–inorganic CsPbIBr_2 perovskite solar cells through interface engineering [J]. *J. Mater. Chem. A*, 7, (3) (2019) 1227 – 1232.
- [16] XU Y, LI G, JING Y, et al. n–type absorber by Cd^{2+} doping achieves high–performance carbon–based CsPbIBr_2 perovskite solar cells. [J].*Journal of colloid and interface science*, 2022, 608:40–47.
- [17] XU Y, LI G, LI R, et al, PbS/CdS heterojunction thin layer affords high–performance carbon–based all–inorganic solar cells. [J] *Nano Energy*, 95, 106973 (2022).
- [18] LEE J, KIM D, KIM H, et al. Formamidinium and cesium hybridization for photo–and moisture–stable perovskite solar cell [J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(20): 1501310.
- [19] ARISTIDOU N, SANCHEZ–MOLINA I, CHOTCHUANGCHUTCHAVAL T, et al. The role of oxygen in the degradation of methylammonium lead trihalide perovskite photoactive layers [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(28): 8208–8212.

Synthesis of Nano TiO_2 and Its Application in CsPbIBr_2 Perovskite Solar Cells

XU Yuan¹, LI Tiantian², ZHANG Kaituo³, WANG Guohai¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Department of Engineering Technology Teaching, Henan Institute of Technology, Xinxiang, 453003, China;

3. Henan Provincial Key Laboratory of Wire and Cable Structure and Materials, Xinxiang 453003, China)

Abstract: TiO_2 is an electron transport material for perovskite solar cells, and its synthesis and application is of great significance to improve the performance of perovskite solar cells. This work used cyclohexane as an organic solvent, oleamine and oleic acid as organic ligands, and synthesizes nano TiO_2 with ligand encapsulation through solvent thermal method. The crystal structure of nano TiO_2 was analyzed by X–ray diffraction (XRD), the microstructure was observed by transmission electron microscopy (TEM), the crystal size was calculated using the Debye Scheler formula, and the spectral absorption and optical band gap of nano TiO_2 was measured by UV visible spectrophotometer. A carbon based CsPbIBr_2 perovskite solar cell based on nano TiO_2 as an electron transport layer (ETL) was assembled to explore the effect of nano TiO_2 concentration on the optoelectronic performance and stability of the device. The results indicate that the nano TiO_2 synthesized by solvothermal synthesis has an anatase structure, with a particle size of 3 nm following a normal distribution and an optical band gap of 3.37 eV. When the TiO_2 concentration is 50 mg mL^{-1} , it exhibits the best photoelectric performance and environmental stability.

Key words: TiO_2 ; solvothermal; solar cells; perovskite

(责任编辑 吕春红)