引用格式：朱银斌，李迎晨，郭沁文，等. 基于水解法 SnO_2 薄膜性能研究及其对钙钛矿太阳电池的影响[J]. 材料工程，2026，54(6)：181-188.
ZHU Yinbin，LI Yingchen，GUO Qinwen，et al. Study on the properties of SnO_2 thin film based on hydrolysis and its effect on perovskite solar cells[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(6)：181-188.

基于水解法 SnO_2 薄膜性能研究及其对钙钛矿太阳电池的影响

朱银斌，李迎晨，郭沁文，蔡宏琨*，倪　举，张建军
（南开大学 电子信息与光学工程学院 电子科学与工程系，天津 300350）

摘要：钙钛矿太阳电池中电子传输层性能是器件效率稳定上升的一个关键因素，也是柔性器件首要考虑的问题。本工作探究了一种 SnO_2 纳米颗粒合成路径，采用无水 $SnCl_4$ 作为锡源，在不外加酸碱的情况下直接与去离子水发生水解反应，用于低温(40～90 ℃)合成氧化锡纳米晶体。SnO_2 的晶粒尺寸直接影响作为电子传输层时的性能，较小的晶粒尺寸可以形成致密平整光滑的薄膜，有利于后续钙钛矿层的沉积，减少漏电流的产生。经优化的 SnO_2 具有优异的光学和电学特性，应用于钙钛矿太阳电池中，器件的光电转换效率达到 20.4%(有效面积 0.13 cm^2)。电子传输层加速提取和输运载流子，其与钙钛矿形成良好的界面，使得太阳电池填充因子和短路电流方面都有显著提高。

关键词：水解法；SnO_2；晶粒尺寸；钙钛矿；太阳电池
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000267　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000267
中图分类号：TM23；TB34　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)06-0181-08

Study on the properties of SnO_2 thin film based on hydrolysis and its effect on perovskite solar cells

ZHU Yinbin，LI Yingchen，GUO Qinwen，CAI Hongkun*，NI Jian，ZHANG Jianjun
（Department of Electronic Science and Technology，College of Electronic Information and Optical Engineering，Nankai University，Tianjin 300350，China）

Abstract：The performance of the electron transport layer in perovskite solar cells is a key factor in achieving stable device efficiency and a primary consideration for flexible devices. In this study，the SnO_2 nanoparticle synthesis pathway is introduced for the low-temperature (40-90 ℃) synthesis of tin oxide nanocrystals using anhydrous $SnCl_4$ as the tin source，which is directly hydrolyzed with deionized water without the addition of an acid or alkali. The grain size of SnO_2 has a direct impact on its performance as an electron transport layer，and a smaller grain size can form a dense，flat，smooth，and thin film，which is favorable for the subsequent deposition of the perovskite layer and reduces the leakage current. The optimized SnO_2 exhibits excellent optical and electrical properties，and the photovoltaic conversion efficiency of the device reaches 20.4% (effective area：0.13 cm^2). The electron transport layer accelerates the extraction and transport of carriers，and its formation of a good interface with the perovskite film leads to significant improvements in terms of solar cell fill factor and short-circuit current.

Key words：hydrolysis；SnO_2；grain size；perovskite；solar cell

在钙钛矿太阳电池中，电子传输层的作用是提取输运电子并阻挡空穴，它是高效、稳定、无迟滞太阳电池的基础[1-3]。电子传输层的关键特性包括与钙钛矿层匹配的能级排列、宽带隙、高透过率和高电导率[4-7]。目前，常用的电子传输层包括 n 型半导体氧化物(如二氧化钛、氧化锡、氧化锌、Zn_2SnO_4 和 $BaSnO_3$)和有机物(PCBM 和 C_{60})[8-11]。致密二氧化钛/介孔二氧化钛层由于其成熟的沉积工艺和较好的光电性能，一直是制

备高效 n-i-p 钙钛矿太阳电池的首选电子传输层[12]。然而，二氧化钛也存在一定的弊端，如退火温度较高且紫外光照射下的稳定性差等，限制了其在商业化进程中的发挥[13]，研究者致力于寻找探索二氧化钛的替代方案。在各种备选材料中，氧化锡表现出一些优秀的特性，如高的带隙透射率、良好的电荷迁移率、适当的能带结构、可低温加工合成、制备工艺简单和良好的化学稳定性等[14-17]，这使得氧化锡成为最有前途的电子传输层材料，近年来受到了广泛的关注。

2015 年，Dai 团队[18]首次将 SnO_2 作为电子传输层引入钙钛矿太阳电池，电子传输层/钙钛矿界面良好的电荷抽取是降低器件迟滞的主要原因。近年来，报道了多种 SnO_2 电子传输层的制备方法，如原子层沉积（ALD）、溶液法、化学浴沉积（CBD）、电化学沉积和原位水热生长等[13,19-21]。ALD 已成为制备高质量 SnO_2 薄膜的有效替代方法，该技术可以精确控制薄膜厚度，具有优越的均匀性和良好的一致性，使其在生产致密、无缺陷的电子传输层（ETLs）方面具有独特优势[22-24]。相比之下，湿法化学路线更受欢迎，其与真空沉积技术相比具有许多优势，例如成本低和易于加工，能更好适应未来的大规模生产[18,25]。目前，低温合成和制备高质量氧化锡仍是光伏领域的研究热点之一[26]。为进一步降低氧化锡制备温度，关键是控制化学反应路径和降低氧化锡纳米颗粒形成能[14]。

本工作提出了一种简单高效的合成路径，采用无水 $SnCl_4$ 作为锡源，在不外加酸碱的情况下直接与去离子水发生水解反应，用于低温（40～90 ℃）合成氧化锡纳米晶体（NCs），通过控制水解条件来调控生成的 SnO_2 纳米晶体的尺寸。经过室温老化，得到直径在 10 nm 以内的稳定氧化锡纳米晶体，可应用于刚性和柔性钙钛矿太阳电池。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

无水四氯化锡（$SnCl_4$，纯度 99.9%），购自上海毕得医药；碘化铅（PbI_2，纯度 99.999%）、甲脒碘（FAI，纯度 99.5%）、溴化铅（PbBr，99.999%）和甲基溴化胺（MABr，纯度 99.9%），均购自上海迈拓威；异丙醇（IPA，纯度 99.5%），购自上海阿拉丁生化科技。

1.2 SnO_2 的合成

常用的商业 SnO_2 水系分散液中，加入了 KOH 来抑制纳米颗粒团聚，溶液本身呈碱性，这也可能在器件的稳定性方面埋下隐患。相比于以 $SnCl_2·2H_2O$、$SnCl_4·5H_2O$ 作为锡源的水热反应，无水 $SnCl_4$ 的水解过程较为缓慢，不需要额外的引入酸或碱来控制不溶性无定形氧化锡的形成。因此采用无水 $SnCl_4$ 作为锡源，将无水 $SnCl_4$ 溶液用常温去离子水稀释至 0.15 mol/L，随后转移至密闭恒温烘箱中水解，经过洗涤、离心、过滤、烘干等操作得到白色 SnO_2 晶体粉末。水解反应如式（1）所示：

$$SnCl_4 + H_2O \xrightarrow{Heat} SnO_2 + HCl\uparrow \quad (1)$$

1.3 钙钛矿太阳电池器件的制备

本实验中 $Cs_{0.05}(FA_{0.83}MA_{0.17})_{0.95}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$ 三元阳离子体系的钙钛矿太阳电池采用正式结构（n-i-p），如图 1 所示，具体器件结构为 ITO 衬底/SnO_2/PVK/spiro-OMeTAD/Au。器件制备工艺流程包括：ITO 玻璃衬底的清洗处理、采用旋涂法制备电子传输层（SnO_2）、钙钛矿吸光层和空穴传输层（spiro-OMeTAD）、蒸镀背金属电极（Au）。其中 SnO_2 层的旋涂工艺参数为 120 μL-800 r/min 旋涂 2 s 后 3000 r/min 下旋涂 30 s，最后 150 ℃的热板上退火 30 min；钙钛矿层为 50 μL-1000 r/min 旋涂 10 s，6000 r/min 下旋涂 30 s，在高速旋涂 15 s 时滴加 180～200 μL 的反溶剂 CB，最后 100 ℃的热板上退火 60 min。空穴传输层的旋涂工艺参数为 45～50 μL-800 r/min 旋涂 2 s，4000 r/min 高速旋涂 30 s，旋涂结束后自然冷却至室温。

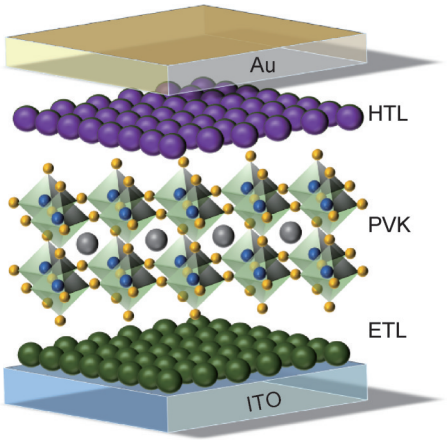


图 1 钙钛矿太阳电池结构示意图

Fig.1 Schematic of the perovskite solar cells

1.4 表征与测试

XRD（Rigaku MiniFlex Ⅱ型）表征材料微观结构；紫外-可见-近红外分光光度计（QTEST STA TION 500AD 型，550 nm）表征钙钛矿层对光的吸收能力；AFM（Dimension Icon 型）表征样品表面形貌特征及其均方根（root mean square，RMS）粗糙度测试。

伏安特性曲线（*J-V*）测试是表征太阳电池器件整体性能的常用手段。在 1 个标准太阳光的照射下

(81904型氙灯,光照强度100 mW/cm^2),测试过程中给太阳电池器件提供连续的电压扫描(Keithley 2611光源计),扫描电压可根据不同吸收层的带隙设置,得到相应的电流值,通过J-V曲线可得到器件的开路电压V_{OC}、短路电流I_{SC}、填充因子FF、光电转换效率E_{PC}等重要参数。光电转换效率如式(2)所示:

$$E_{PC}=\frac{P_{max}}{P_{inc}}\times 100\%=\frac{FF\times I_{SC}\times V_{OC}}{P_{inc}}\times 100\% \quad (2)$$

在半导体或其他电子器件中,当存在较高强度电场或器件尺寸较小时,此时电子或空穴在材料中移动时,由于空间中的电荷分布不均匀而限制电流密度,它们会受到周围空间电荷的影响,从而导致电荷在器件内部积累并形成电场,限制载流子的移动,进而影响到整个器件的电流输出特性。通过制备双电子或双空穴结构的单载流子器件,对其进行J-V测试(暗态条件下),通过分析暗态J-V特性曲线得到器件的缺陷密度等信息。其中主要用到了陷阱填充极限电压(V_{TFL}),即欧姆区和缺陷填充区的交点对应的电压,用来计算器件的缺陷密度,如式(3)所示:

$$V_{TFL}=\frac{eN_tL^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} \quad (3)$$

式中:e代表电子电荷值;N_t代表器件的缺陷密度;L为薄膜厚度;ε是材料的相对介电常数;ε_0为真空介电常数。

2　结果与分析

作为电子传输层时,SnO_2纳米颗粒的尺寸直接影响到整个器件的性能,在无水$SnCl_4$的水解过程中,反应时间和反应温度共同决定着最终生成SnO_2的粒径,可通过反应时间来调控生成的SnO_2的晶粒尺寸,结果如图2(a)所示。随着反应时间的增加,溶液透明度下降,从最初的无色透明逐渐变浑浊,利用红色激光笔测试其丁达尔效应,激光笔照射形成的光路逐渐清晰再变得不透光,这主要是因为反应时间超过90 min后,溶液中粒子数增多,比表面积大,表面能高,处于能量不稳定状态,纳米颗粒发生团聚现象,SnO_2颗粒的尺寸变大,从胶体变为悬浊液。



图2　不同水解时间下生成的SnO_2激光照射的照片(a)及XRD谱图(b)

Fig.2　Photographs of laser irradiation(a) and XRD patterns(b) of SnO_2 powders prepared at different hydrolysis time

图2(b)为水解时间为60、90、120、180 min时制备的氧化锡粉末样品的XRD谱图。从XRD图谱中可以看出,在26.6°、33.9°、37.9°、51.9°处均有衍射峰,具有正方金红石结构,同时未发现金属锡或其他锡氧化物的衍射峰,说明不同水解时间下SnO_2粉末都是结晶的,不会产生其他锡的氧化物杂质。但不同水解温度下的XRD图谱略有不同,60、90 min条件下的SnO_2在(110)、(101)方向上的衍射峰较强且衍射峰的半高宽较小;随着时间增长,衍射峰的半高宽增大,这可能是因为水解生成的SnO_2在结晶质量和晶粒尺寸方面有所不同,从XRD谱图中可以看出,水解时间为60、90 min时所得到的SnO_2在晶体质量和晶粒尺寸方面的表现最佳。

动态光散射技术(DLS)是通过一定波长的光照射悬浮颗粒的溶液或气溶胶样品,利用颗粒对光的散射特性,结合布朗运动理论,通过分析散射光的模式和频率,来确定颗粒的尺寸和浓度。采用动态光散射技术进一步测试了SnO_2异丙醇溶液中的纳米颗粒的尺寸,测试结果如图3所示。当水解时间不超过120 min时,制备的SnO_2在晶粒尺寸方面均具有较强的单一性,分布比较集中,对平均晶粒尺寸的贡献全都来自小尺寸颗粒,溶液中不存在大尺寸的颗粒。超过120 min时,SnO_2纳米颗粒团聚现象加剧,出现了大尺寸的粒子,晶粒尺寸的分布范围分为明显的两部分。水解时间在30、60、90、120、150、180 min条件下对应的平均晶粒尺寸分别为7.891、8.364、8.719、8.966、9.642、10.57 nm。

图4(a)可以看出,SnO_2纳米颗粒的大小与水解时

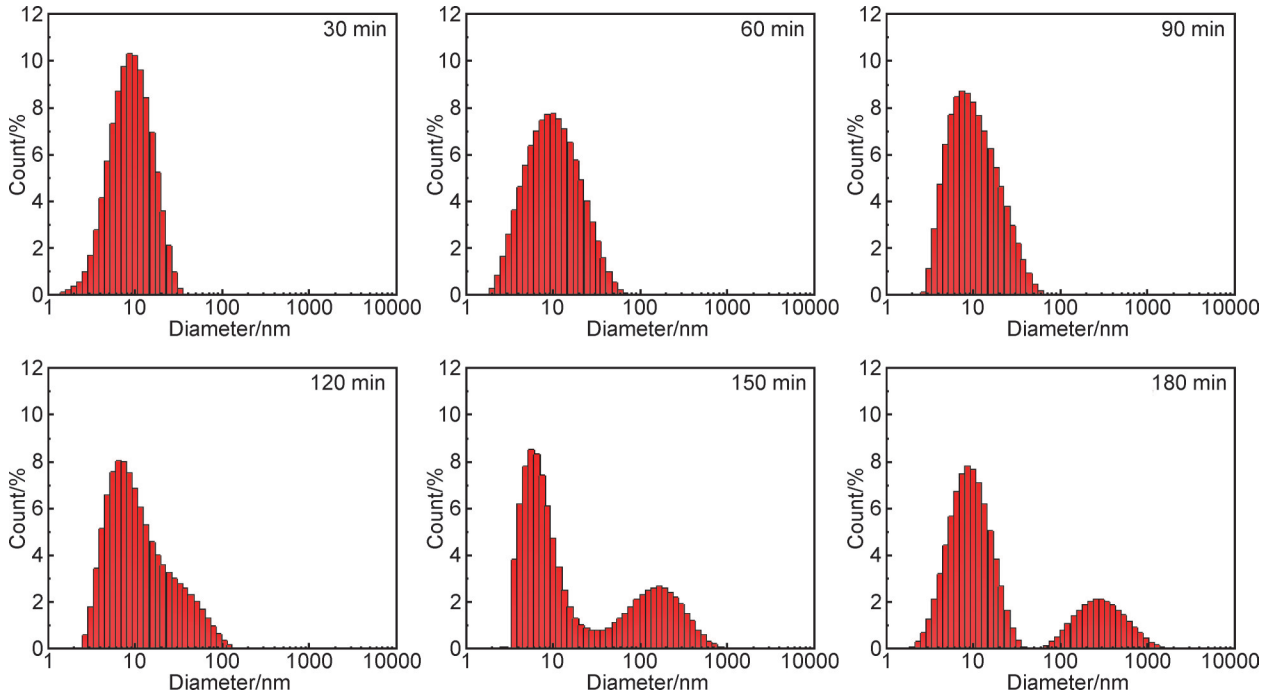


图 3 不同水解时间下制备的 SnO_2 溶液的 DLS 图谱

Fig.3 DLS profiles of SnO_2 prepared at different hydrolysis time

间近似成正相关，水解时间越长，得到的 SnO_2 纳米颗粒的尺寸越大，这是因为随着反应的进行，溶液中的粒子浓度变大，小尺寸的粒子会发生团聚现象，导致晶粒尺寸增大，温度超过 120 ℃时，变化的幅度增大这也与水解过程中溶液逐渐变浑浊的实验现象相一致。

为了进一步探究水解得到的 SnO_2 的光学和电学特性，采用旋涂法将氧化锡前驱体涂覆在玻璃衬底上，测试了不同水解时间下的氧化锡薄膜的横向电导（图 4(b)）和光透过率（图 4(c)），可以看到 60 min 对应的薄膜的横向电导率较大，180 min 对应的薄膜的横向电导较小。这主要是因为较小的晶粒尺寸意味着更大的比表面积，随着溶剂的挥发，处于能量不稳定状态的粒子相互吸附结晶，形成致密平整的薄膜，这将减少电子的传递势垒，导电性能有所提高。总体来说，不同水解时间下得到的 SnO_2 薄膜的光透过率的变化相对较小，说明晶粒尺寸的微小变化并不会对薄膜的光学特性产生较大的影响。图 4(d) 为不同水解时间下制备的 SnO_2 薄膜的 AFM 图像，可以看出，水解法制备的 SnO_2 的薄膜粗糙度普遍较小，水解时间为 30、60、90、120、150、180 min 时对应的粗糙度分别为 1.68、1.38、1.44、1.64、1.61、1.76 nm。随着水解时间的增加，SnO_2 薄膜的粗糙度逐渐变大，这主要是因为反应时间越长，SnO_2 纳米颗粒出现团聚的现象越明显，晶粒尺寸变大，最终导致旋涂得到的 SnO_2 薄膜的粗糙度增大。当作为电子传输层时，薄膜会因涂覆不均匀而出现孔洞，这将导致钙钛矿层直接与 ITO 衬底接触而产生漏电流。此外，电子传输层的粗糙度也会影响到上层钙钛矿的沉积，粗糙度变大，会对钙钛矿层与电子传输层的界面接触产生影响，从而加剧了载流子在界面处的复合，影响到整体钙钛矿太阳电池器件的性能。但粗糙度在 1～2 nm 之间的 SnO_2 薄膜致密性都满足器件要求，此时更多的是材料电学和光学特性影响器件性能。

图 5(a) 为基于不同水解时间下得到的 SnO_2 制备的太阳电池的器件光电转换效率统计箱线图，随着水解时间的增长，器件效率先上升后下降，水解时间在 60 min 条件下器件性能表现最好，平均效率达到 18.5%，水解时间为 180 min 时器件的整体效率最低。可以看出，不同水解时间下得到的 SnO_2 对太阳电池器件的短路电流密度（图 5(b)）和开路电压（图 5(c)）都有一定的影响，J_{SC} 和 V_{OC} 的变化趋势和效率的变化一致，均为先上升后下降，最高的短路电流和开路电压都出现在 60 min 条件下；填充因子方面（图 5(d)），各个实验组之间的变化趋势不明显，基本都分布在 69～76 的区间内。这就说明，水解法制备的 SnO_2 晶粒尺寸越小，旋涂出的薄膜更加平整光滑，当钙钛矿吸收层涂覆在上面时可以形成更好的界面接触，减少了漏电损失，对开压的提高有一定的帮助。同时材料电学特性的提高使得载流子快速抽取，在界面处的复合损失减少，从而使器件的短路电流密度增大。

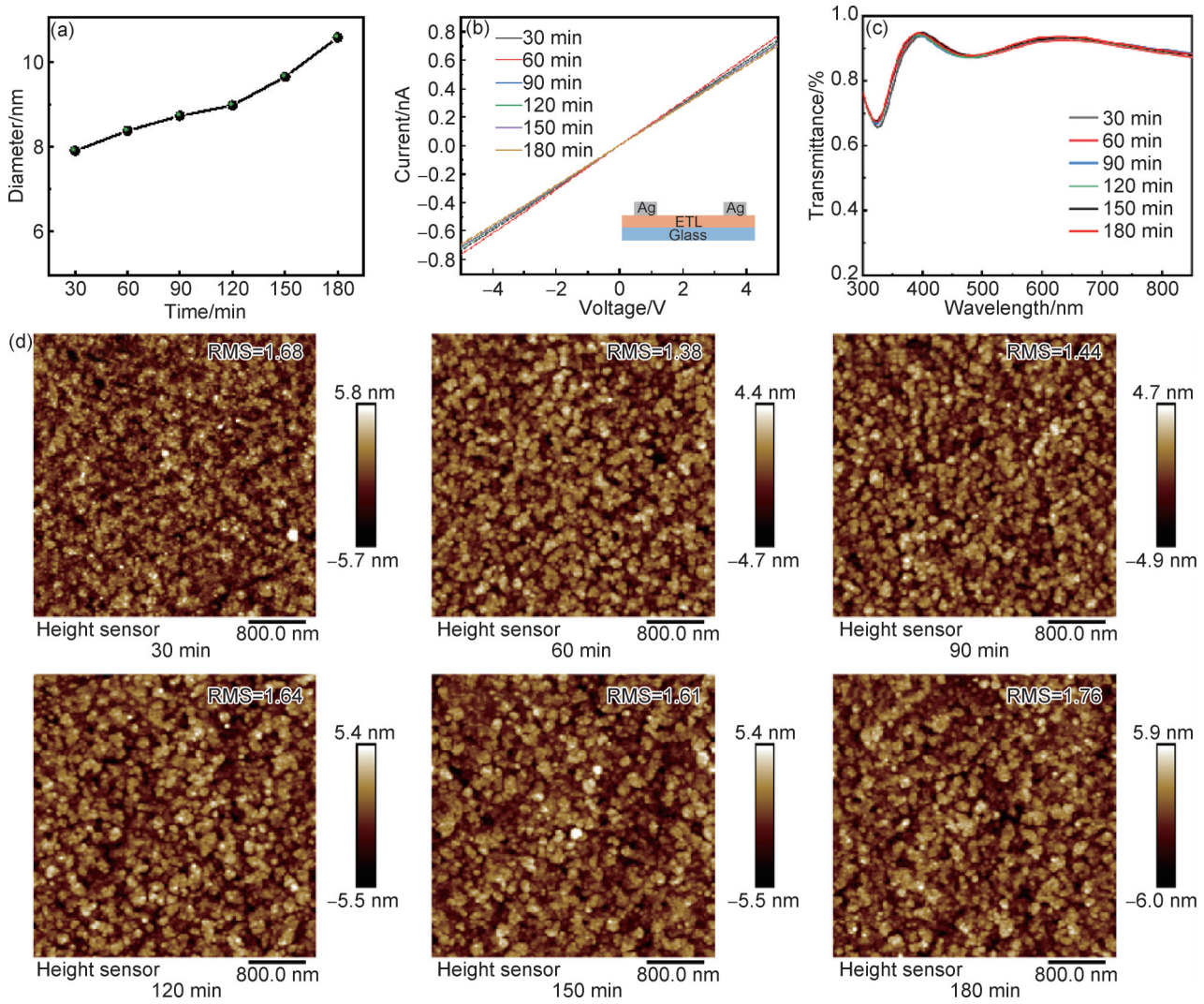


图4　SnO_2 平均粒径的变化图(a)，不同水解时间下制备的 SnO_2 薄膜的横向电导(b)、透过测试(c)和AFM图像(d)

Fig.4　Plot of SnO_2 average grain size(a), and transverse conductance(b), transmittance test(c), and AFM images(d) of SnO_2 films prepared at different hydrolysis time

为了进一步分析载流子在界面处的传输，测试标准模拟光(AM 1.5G，100 mW/cm^2)照射下的电化学阻抗谱，得到了对应的奈奎斯特曲线，如图6(a)所示，能够发现在Nyquist图中高频区域出现了明显的圆弧，代表了器件的电荷传输电阻(R_{ct})，圆弧的半径与电荷转移电阻成正比，半径越大，则表示载流子的电荷转移势垒越大。对比可以发现水解时间为60 min时制备的器件在高频区域的R_{ct}最小，表明SnO_2导电性能的提高使得载流子在界面处的传输势垒减小，插图为用ZSimpWin软件对高频半圆拟合的等效电路模型。图6(b)的暗态J-V测试结果所示，水解时间为60 min时对应的器件的漏电流最小，载流子产生率降低，陷阱密度减小。这主要归因于60 min条件下的SnO_2电导率较高，较小的晶粒尺寸可以形成光滑平整的电子传输层，与钙钛矿层的接触更加充分，减小了载流子的传输势垒，有利于载流子在界面处的转移和在传输层上的传输。

图7(a)为水解时间为60 min条件下的冠军器件的J-V测试结果，最高效率为20.4%(有效面积为0.13 cm^2)，开路电压为1.13 V，短路电流密度为23.0 mA/cm^2，填充因子为76.5%，结合外量子效率(external quantum efficiency，EQE)测试，如图7(b)所示，钙钛矿吸光层在400～600 nm波段的响应均超过了80%，积分电流为22.5 mA/cm^2，这也与J-V测试的短路电流密度结果相一致。同时，以广泛使用的商业SnO_2作为对照组，相同条件下制备的钙钛矿太阳电池效率为19.35%(图8(a)，(b))，可以看出，水解法制备的SnO_2在电流、开压和填充方面均有一定的优势，这主要得益于晶粒尺寸的变小，能够形成致密光滑的薄膜，改善了电子传输层的导电性能和界面接触。

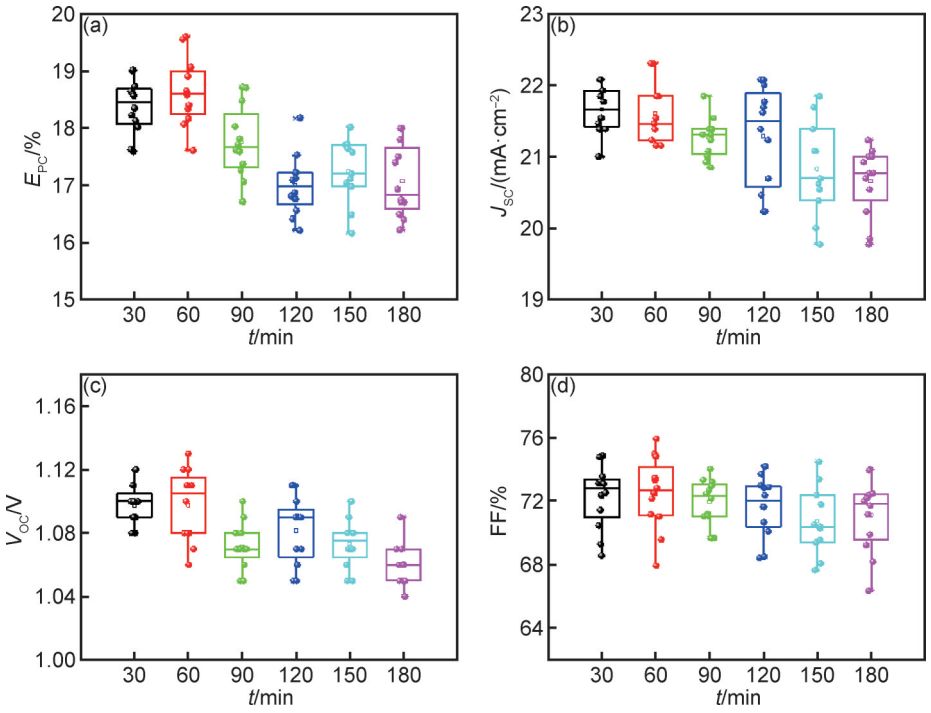


图5 基于不同水解时间下的SnO_2制备的器件的光电转化效率(a)、短路电流密度(b)、开路电压(c)及填充因子(d)的统计图

Fig.5 Statistical plots of photoelectric conversion efficiency(a), short-circuit current density(b), open-circuit voltage(c), and fill factor of devices(d) prepared based on SnO_2 with different hydrolysis time

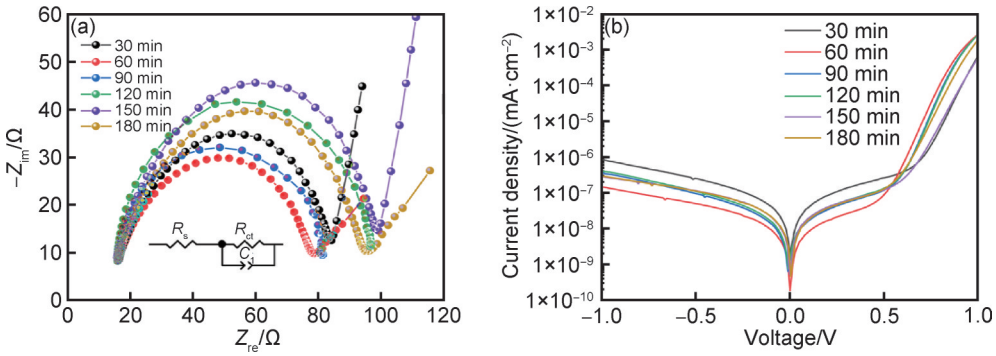


图6 基于不同水解时间下的SnO_2制备的器件的电化学阻抗谱(a)和暗态J-V谱(b)

Fig.6 Electrochemical impedance plots(a) and dark state J-V plots(b) of devices prepared based on SnO_2 at different hydrolysis time

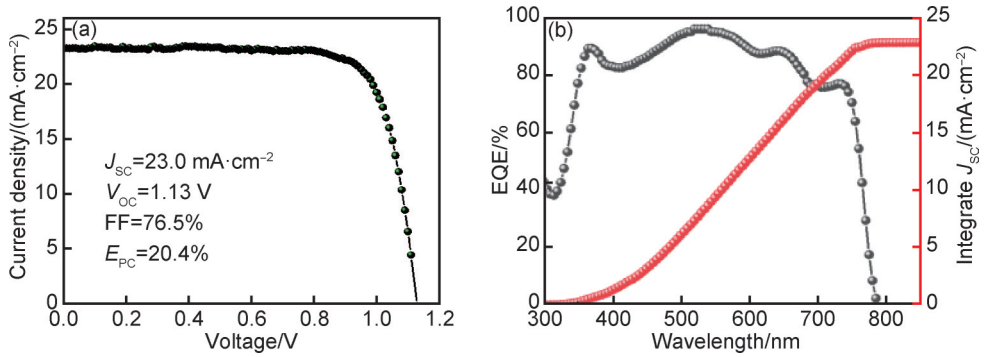


图7 水解SnO_2基商业器件的J-V(a)和EQE(b)曲线

Fig.7 J-V(a) and EQE(b) plots of the hydrolysis SnO_2-champion device

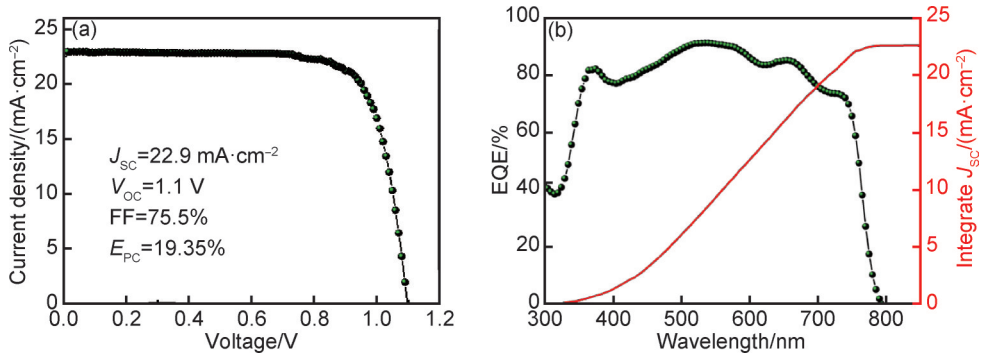


图8　商业SnO_2基冠军器件的J-V(a)和EQE曲线(b)

Fig.8　J-V(a) and EQE(b) plots of the commerce SnO_2-champion device

3　结论

(1)采用无水$SnCl_4$作为锡源,水解法制备SnO_2纳米颗粒作为电子传输层。在无水$SnCl_4$的水解过程中,随着反应时间的增加,溶液中的粒子浓度变大,小尺寸的粒子会发生团聚现象,导致出现较大尺寸的晶粒,形成的薄膜可能会因涂覆不均匀而出现孔洞,导电性能下降。

(2)较小晶粒尺寸的SnO_2可以形成致密平整的电子传输层,与钙钛矿层的接触更加充分,有利于载流子在界面处的转移。水解时间为60 min时生成的SnO_2的平均晶粒尺寸为8.36 nm,具有优异的光学和电学特性,制备成的薄膜质量较高,粗糙度为1.38 nm,有利于加速载流子的提取和输运,减少界面处电荷因堆积而造成的非辐射复合损失。

(3)制备的钙钛矿太阳电池器件填充因子和短路电流方面都有提高,最高光电转换效率可达20.4%(有效面积0.13 cm^2)。

参考文献

[1] SNAITH H J, DUCATI C. SnO_2-based dye-sensitized hybrid solar cells exhibiting near unity absorbed photon-to-electron conversion efficiency[J]. Nano Letters, 2010, 10(4): 1259-1265.

[2] CAO X, SHU Y C, HU Y N, et al. Integrated process of large-scale and size-controlled SnO_2 nanoparticles by hydrothermal method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 725-730.

[3] HUU N K, SON D Y, JANG I H, et al. Hierarchical SnO_2 nanoparticle-ZnO nanorod photoanode for improving transport and life time of photoinjected electrons in dye-sensitized solar cell[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(3): 1038-1043.

[4] PENG W, MAO K, CAI F, et al. Reducing nonradiative recombination in perovskite solar cells with a porous insulator contact[J]. Science, 2023, 379(6633): 683-690.

[5] PARK J, KIM J, YUN H S, et al. Controlled growth of perovskite layers with volatile alkylammonium chlorides[J]. Nature, 2023, 616(7958): 724-730.

[6] CHEN Y, WANG Q, YAO Y, et al. Synergistic transition metal ion co-doping and multiple functional additive passivation for realizing 25.30% efficiency perovskite solar cells[J]. Energy & Environmental Science, 2023, 16(11): 5243-5254.

[7] GAO Y, HUANG K, LONG C, et al. Flexible perovskite solar cells: from materials and device architectures to applications[J]. ACS Energy Letters, 2022, 7(4): 1412-1445.

[8] REDDY S H, DI GIACOMO F, DI CARLO A. Low-temperature-processed stable perovskite solar cells and modules: a comprehensive review[J]. Advanced Energy Materials, 2022, 12(13): 2103534.

[9] FOO S, THAMBIDURAI M, SENTHIL KUMAR P, et al. Recent review on electron transport layers in perovskite solar cells[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(15): 21441-21451.

[10] CHEN R, ZHANG W, GUAN X, et al. Rear electrode materials for perovskite solar cells[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(26): 2200651.

[11] CAO J, WU B, CHEN R, et al. Efficient, hysteresis-free, and stable perovskite solar cells with ZnO as electron-transport layer: effect of surface passivation[J]. Advanced Materials, 2018, 30(11): 1705596.

[12] DING Y, DING B, KANDA H, et al. Single-crystalline TiO_2 nanoparticles for stable and efficient perovskite modules[J]. Nature Nanotechnology, 2022, 17(6): 598-605.

[13] DAGAR J, CASTRO-HERMOSA S, GASBARRI M, et al. Efficient fully laser-patterned flexible perovskite modules and solar cells based on low-temperature solution-processed SnO_2/mesoporous-TiO_2 electron transport layers[J]. Nano Research, 2018, 11(5): 2669-2681.

[14] UWIHOREYE V, YANG Z, ZHANG J Y, et al. Transparent conductive SnO_2 thin films *via* resonant Ta doping[J]. Science China Materials, 2023, 66(1): 264-271.

[15] PARK S Y, ZHU K. Advances in SnO_2 for efficient and stable n-i-p perovskite solar cells[J]. Advanced Materials, 2022, 34(27): 2110438.

[16] KIM S, ZHANG F, TONG J, et al. Effects of potassium treatment on SnO_2 electron transport layers for improvements of perovskite solar cells[J]. Solar Energy, 2022, 233: 353-362.

[17] GUO Y, YIN X, LIU J, et al. Vacuum thermal-evaporated SnO_2 as uniform electron transport layer and novel management of perovskite intermediates for efficient and stable planar perovskite solar cells [J]. Organic Electronics, 2019, 65: 207-214.

[18] LI Y, ZHU J, HUANG Y, et al. Mesoporous SnO_2 nanoparticle films as electron-transporting material in perovskite solar cells[J]. RSC Advances, 2015, 5(36): 28424-28429.

[19] XIONG L, LI J, YE F, et al. Bifunctional SnO_2 colloid offers no annealing effect compact layer and mesoporous scaffold for efficient perovskite solar cells[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(36): 2103949.

[20] SONG P, SHEN L, ZHENG L, et al. Double-layered SnO_2/NH_4Cl-SnO_2 for efficient planar perovskite solar cells with improved operational stability[J]. Nano Select, 2021, 2(9): 1779-1787.

[21] ZHANG S, SI H, FAN W, et al. Graphdiyne: bridging SnO_2 and perovskite in planar solar cells[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59(28): 11573-11582.

[22] MIN H, LEE D Y, KIM J, et al. Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO_2 electrodes[J]. Nature, 2021, 598(7881): 444-450.

[23] MAI L, ZANDERS D, SUBAŞI E, et al. Low-temperature plasma-enhanced atomic layer deposition of tin(Ⅳ) oxide from a functionalized alkyl precursor: fabrication and evaluation of SnO_2-based thin-film transistor devices[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(3): 3169-3180.

[24] AYDIN E, DE BASTIANI M, DE WOLF S. Defect and contact passivation for perovskite solar cells[J]. Advanced Materials, 2019, 31(25): 1900428.

[25] JIANG Q, ZHANG X, YOU J. SnO_2: a wonderful electron transport layer for perovskite solar cells[J]. Small, 2018, 14(31): 1801154.

[26] SUN Q, LI H, GONG X, et al. Interconnected SnO_2 nanocrystals electron transport layer for highly efficient flexible perovskite solar cells[J]. Solar RRL, 2020, 4(2): 1900229.

基金项目:国家自然科学基金(61974074)

收稿日期:2024-04-15;**录用日期**:2024-07-17

通讯作者:蔡宏琨(1980—),女,教授,博士,主要研究半导体材料与器件,联系地址:天津市津南区同砚路南开大学新校区电子信息与光学工程学院(300350),E-mail:1769413620@qq.com

(本文责编:齐 新)