

钙钛矿/有机串联叠层光伏器件的制备及性能表征 ——推荐一个大学化学研究型综合实验

谭占鳌^{1,*}, 李明华^{1,2}, 王文立², 孙振宇²

¹北京化工大学北京软物质科学与工程高精尖创新中心, 北京 100029

²北京化工大学化学工程学院, 北京 100029

摘要: 钙钛矿材料具备优异光电性能和带隙可调的特性, 是制备高效光伏器件的良好选择。有机太阳能电池具有溶液制备和可柔性弯折的特点, 与钙钛矿太阳能电池具有相似的器件结构。构建钙钛矿/有机串联叠层可有效提升光谱利用率, 突破单结器件的理论效率, 展现出更广阔的应用潜力。本实验以串联叠层光伏器件前沿进展为出发点, 推荐一个综合化学设计性实验, 使本科生学习了解钙钛矿/有机叠层电池的原理及进展, 并以此为基础提高其创新思维与实验实践综合能力。本实验中的串联叠层钙钛矿器件包括宽带隙钙钛矿前结子电池、中间层以及有机后结子电池, 涉及了基于液相法和真空气相法的薄膜制备过程, 通过扫描电子显微镜和X射线衍射表征钙钛矿薄膜的微观形貌与结晶特性, 使用模拟太阳光和电学测试系统测量制备叠层器件的光电性能。本实验难度适中, 涉及内容丰富, 旨在让学生通过本实验去了解光伏器件的工作原理和前沿发展, 提升学生对光伏电池的兴趣, 并培养其科研创新及实践能力。

关键词: 钙钛矿太阳能电池; 综合化学实验; 叠层光伏电池; 光电性能

中图分类号: G64; O6

Preparation and Performance Characterization of Perovskite/Organic Tandem Photovoltaic Devices: A Comprehensive Researching Chemistry Experiment

Zhan'ao Tan^{1,*}, Minghua Li^{1,2}, Wenli Wang², Zhenyu Sun²

¹ Beijing Advanced Innovation Center for Soft Matter Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China.

² College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China.

Abstract: Perovskite materials exhibit excellent optoelectronic properties and tunable bandgaps, making them a promising choice for efficient photovoltaic devices. Organic solar cells, with features like solution processing and flexibility, share a similar device structure with perovskite solar cells. Building perovskite/organic tandem structures can effectively enhance spectral utilization, surpassing the theoretical efficiency of single-junction devices, showing broader application potential. This experiment, starting from the forefront progress of tandem photovoltaic devices, recommends a comprehensive chemical design experiment for undergraduate students to understand the principles and advancements of perovskite/organic tandem cells, aiming to enhance their innovative thinking and experimental skills. The experiment involves tandem perovskite devices consisting of wide-bandgap perovskite front sub-cells, an intermediate layer, and organic rear sub-cells, covering thin film fabrication processes based on liquid-phase and vacuum deposition methods. Characterization of perovskite films' microstructure and crystalline properties is

收稿: 2024-05-07; 录用: 2024-08-13; 网络发表: 2024-08-28

*通讯作者, Email: tanzhao@mail.buct.edu.cn

基金资助: 科教融汇教改项目(2024JGKJ015)

conducted using scanning electron microscopy and X-ray diffraction, while the photovoltaic performance of prepared tandem devices is measured using simulated sunlight and electrical testing systems. With moderate difficulty and rich content, this experiment aims to enable students to comprehend the working principles and frontier developments of photovoltaic devices, fostering their interest in solar cells and nurturing their research innovation and practical skills.

Key Words: Perovskite tandem solar cells; Comprehensive chemistry experiment; Tandem photovoltaic cells; Photovoltaic performance

随着环境污染与能源危机的日益加剧,传统能源转型的问题受到了世界广泛关注,我国政府提出“双碳”目标:力争于2030年前达到二氧化碳排放峰值,努力争取2060年前实现碳中和。太阳能电池作为太阳能最直接、最有效的转化及利用方法之一,基于材料及结构创新发展取得了令人瞩目的性能突破。近年来,新型钙钛矿太阳能电池(PSCs)快速发展,已获得了26%以上的单结光电转换效率(PCE)^[1]。

由于热弛豫和载流子复合等问题,单结钙钛矿光伏器件的理论转化效率仅为31%。构建叠层光伏器件(TSCs)可显著提高光能利用率,减少载流子的热损失,从而将理论效率提升到46%^[2]。在串联叠层光伏器件中,宽带隙(WBG)钙钛矿光伏器件在收集高能光子和提供高开压(V_{oc})方面具有重要优势,适合作为叠层器件的前结子电池^[3,4]。窄带隙(NBG)有机光伏器件具有溶液制备与柔性可拉伸的特性,并与钙钛矿太阳能电池具有相似结构,适合作为叠层器件的后结子电池^[5]。因此,构建兼具钙钛矿和有机光伏器件优点的钙钛矿/有机串联叠层光伏器件具有重要的研究意义和应用价值。

综合化学实验旨在通过实践操作加深学生对理论知识的理解,进而提高学生实验操作技能。这种全面的实践培训有助于学生全面发展,培养其综合素质,包括动手能力、逻辑思维、团队合作能力等。通过参与综合化学实验,学生将锻炼并逐步提高自己的科研能力,为将来从事科学研究奠定良好基础。在实验过程中可锻炼自己的综合能力,包括分析问题、整合资源、解决难题等,从而全面提升自己的综合素质^[6]。本综合性化学实验主要涉及钙钛矿/有机串联叠层光伏器件的制备及测试过程。通过本实验,学生将学习并掌握器件制备的全过程,加深对化学实验基本原理的理解,提高实验操作水平,培养科研素养和创新能力。实验的设计不仅注重学生实验技能的提升,更强调培养其科研能力和创新思维。通过文献查找与阅读、实验设计与思考等环节,有助于提升科研基本功,强化独立思考和解决问题的能力。这将为他们未来在科研领域或工程实践中提供坚实的基础,有助于激发对科学探索的热情与兴趣。

综上所述,本实验将钙钛矿/有机串联叠层器件的制备过程与学生的综合素质培养相结合,为他们提供了一次全面参与科学研究的体验。这不仅有助于学生加深对化学原理的理解和实践技能的掌握,更重要的是培养了其科研素养和创新能力,为其未来的学术研究和职业发展奠定了坚实的基础。因此,这样的综合性化学实验模式值得在大学生教育中推广学习,以促进学生全面发展和科研能力的提升。

1 实验部分

1.1 实验目的

- (1) 了解和学习钙钛矿/有机串联叠层光伏器件的前沿进展。
- (2) 掌握钙钛矿/有机串联叠层光伏器件的工作原理及光电转换效率限制因素。
- (3) 掌握高质量钙钛矿薄膜制备方法和微观结构性能测试方法。
- (4) 掌握钙钛矿/有机串联叠层光伏器件的光电转化效率和稳定性的测试方法。

1.2 实验原理

典型钙钛矿/有机串联叠层光伏器件结构如图1a所示。当光照射到钙钛矿层时,光子能量被吸收,激发了其中的电子,使其跃迁到导带中,形成了自由电子。同时,这个过程也会在价带中留下一个

空穴，这个空穴也可以被看作是正电荷的载流子。这样，光激发过程产生了电子和空穴，它们是太阳能电池中的载流子，负责电流的输送。钙钛矿活性层和有机电池活性层产生的电子分别进入各自的电子传输层，同样地，空穴载流子进入各自的空穴传输层，前节钙钛矿空穴传输层将空穴载流子运输至金属氧化物导电层，有机太阳能电池活性层的电子传输层将电子载流子传输到顶部银电极。钙钛矿子电池的电子传输层、金属氧化物复合层、有机子电池的空穴传输层共同形成中间互连层^[5,7]。中间金属氧化物复合层将钙钛矿子电池电子传输层输送来的电子和有机子电池空穴传输层传输的空穴复合到一起，形成电流^[8]。

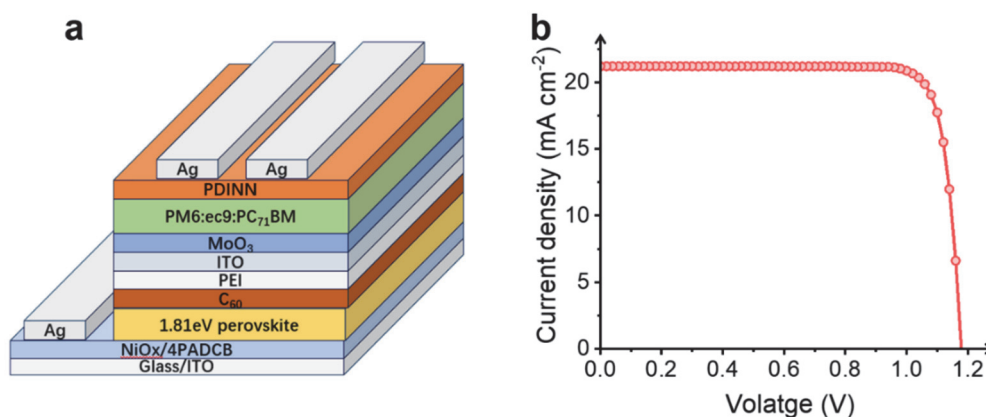


图1 (a) 串联叠层光伏器件结构示意图; (b) 典型电流-电压曲线

$$\text{PCE} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\max} \times V_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

钙钛矿太阳能电池的性能通常通过其电流-电压曲线(图1b)来评估，其主要测量参数包括开路电压(V_{oc})、短路电流密度(J_{sc})、填充因子(FF)和转换效率(PCE)，这些参数之间的关系可反映光伏器件光电转化转换的性能优劣(式(1))。开路电压与材料的能带结构和电子-空穴对的结合能有关，提高开路电压可以增加电池在无外部负载时的电压输出。短路电流密度与光照强度和材料的吸收能力有关，增加短路电流密度可以增加电池在短路条件下的电流输出。填充因子反映了电池内部电阻、载流子的复合以及接触电阻等因素对电池性能的影响，提高填充因子可以减少电池的内部损耗，从而提高电池的输出功率。因此，通过优化这些参数，可以提高太阳能电池的光电转换效率。

1.3 实验仪器与试剂

实验所用的仪器和试剂如表1、表2所示。

表1 实验仪器

仪器名称	型号	厂家
扫描电子显微镜	S-4700	日本日立
台式匀胶机	KW-4A	中国科学院微电子研究所
紫外臭氧机(UVO)	CL1600	北京北科新仪科技有限公司
超声清洗器	KQ-2200E	昆山市超声仪器有限公司
氮气手套箱	-	苏州威格科技有限公司
真空蒸发镀膜设备	ZB-400	北京微纳真空技术有限公司
热台	SH-2	北京东方器材有限公司
标准太阳光模拟器AM1.5	SS-X220R	台湾光焱科技有限公司
EQE	QE-M110	台湾光焱科技有限公司

表2 实验试剂

物品	生产公司	规格	物品	生产公司	规格
ITO玻璃	中诺新材(北京)	表面电阻15 Ω/sq	FABr	西安宝莱特	99.99%
乙醇(EtOH)	Alfa Aesar	99.5+%, 超干	CsI	西安宝莱特	99.99%
氯苯(CB)	Alfa Aesar	99.5+%, 超干	CsBr	西安宝莱特	99.99%
异丙醇(IPA)	Alfa Aesar	99.5+%, 超干	C ₆₀	西安宝莱特	99.99%
二甲亚砜(DMSO)	Alfa Aesar	99.5+%, 超干	聚乙烯亚胺(PEI)	北京伊诺凯	99.99%
N,N-二甲基甲酰胺(DMF)	Alfa Aesar	99.5+%, 超干	BCP	西安宝莱特	99.99%
NiO _x	北京优选科技	99.99%	PM6	北京朔纶有机光电	99.99%
乙烷-1,2-碘化二铵(EDAI2)	西安宝莱特	99.99%	ec9	北京朔纶有机光电	99.99%
PbI ₂	西安宝莱特	99.99%	PC ₇₁ BM	北京朔纶有机光电	99.99%
PbBr ₂	西安宝莱特	99.99%	钼片	中诺新材(北京)	-
FAI	西安宝莱特	99.99%	Ag	中诺新材(北京)	99.999+%

1.4 电池器件制备

1.4.1 宽带隙钙钛矿前驱体电池制备流程

(1) 将CsI (0.144 mol·L⁻¹)、CsBr (0.096 mol·L⁻¹)、FAI (0.576 mol·L⁻¹)、FABr (0.384 mol·L⁻¹)、PbI₂ (0.756 mol·L⁻¹)和PbBr₂ (0.48 mol·L⁻¹)溶解于DMF/DMSO (体积比为4 : 1)混合溶剂中, 制备浓度为1.2 mol·L⁻¹的宽带隙钙钛矿(Cs_{0.2}FA_{0.8}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})₃)前驱体溶液。

(2) 将镀有铟掺杂氧化锡(ITO)的透明玻璃基底依次用洗涤剂、自来水、去离子水、异丙醇、乙醇分别超声清洗15 min各两次。然后将清洗后的ITO玻璃基板烘干, 并且对其使用紫外臭氧处理20 min。

(3) 将NiO_x溶液(10 mg·mL⁻¹, 去离子水)在ITO衬底上以3000 r·min⁻¹旋涂30 s, 然后在空气中150 °C退火15 min, 然后将样品转移到氮气手套箱中。

(4) 将4PADCB溶液(0.5 mg·mL⁻¹, 乙醇)在NiO_x衬底上以4000 r·min⁻¹旋涂30 s, 然后100 °C退火10 min。

(5) 通过液相旋涂法将钙钛矿前驱体沉积在已制备好基底上, 转速为4000 r·min⁻¹, 旋涂时间为30 s, 在旋涂结束前10 s快速滴加180 μL氯苯作为反溶剂提升薄膜结晶质量, 然后100 °C退火15 min^[9]。

(6) 将钝化层溶液EDADI (1mg·mL⁻¹, 异丙醇)以5000 r·min⁻¹旋涂30 s沉积在制备好的钙钛矿薄膜表面。

(7) 随后将样品转移到真空蒸镀仓中沉积电子传输层(C₆₀, 20 nm)。

1.4.2 中间层制备流程

(1) 将PEI溶液(1 mg·mL⁻¹, 异丙醇)以5000 r·min⁻¹旋转涂覆30 s沉积在C₆₀层顶部^[10]。采用磁控溅射法制备ITO复合层(厚度约为5 nm)。

(2) 在ITO基底上蒸镀20 nm MoO₃作为后节有机光伏电池的空穴传输层。

1.4.3 窄带隙有机后结子电池制备流程

(1) 配制PM6 : eC9 : PC71BM (质量比为1 : 1.5 : 0.3)有机活性层溶液, 其中PM6浓度为7.5 mg·mL⁻¹, 在氯仿中70 °C搅拌2 h。

(2) 有机活性层溶液4000 r·min⁻¹旋涂30 s, 随后85 °C退火5 min。

(3) 将PDINN (1 mg·mL⁻¹, 甲醇)沉积在有机活性层上(4000 r·min⁻¹旋涂30 s), 无需退火。

(4) 蒸镀100 nm银电极完成串联叠层器件制备。

1.5 表征测试

(1) 光伏器件光电转换效率测试: 在标准太阳光下进行测试, 设置开路电压测试范围为-0.1–2.2 V,

测试未封装的反式钙钛矿/有机串联叠层光伏器件, 获得相应的光电转化效率参数(开路电压、电流密度、填充因子)。

(2) 钙钛矿薄膜微观形貌和结构表征: 制备目标钙钛矿薄膜表面样品, 在扫描电子显微镜上拍摄钙钛矿薄膜的微观形貌照片, 在X射线衍射仪上探测薄膜晶体结构特性。

(3) 光照稳定性测试: 在模拟太阳光下, 测试最大输出功率的变化。

1.6 结果与讨论

1.6.1 钙钛矿薄膜的形貌及结构表征

为直观地了解多晶钙钛矿薄膜的微观形貌特征, 对制备的钙钛矿薄膜进行扫描电子显微镜(SEM)测试。如图2a所示, 钙钛矿薄膜晶粒尺寸均匀, 且致密无孔洞, 可有效减少晶界缺陷, 有利于抑制复合损失。

在X射线衍射图谱(图2b)中, 在 14.4° 和 28.8° 处存在两个突出的衍射峰, 为钙钛矿薄膜的(100)和(200)晶面, 说明钙钛矿薄膜的主要结晶方向是沿着100方向进行的, 高结晶性薄膜有利于载流子的传输分离和获得高效率器件。

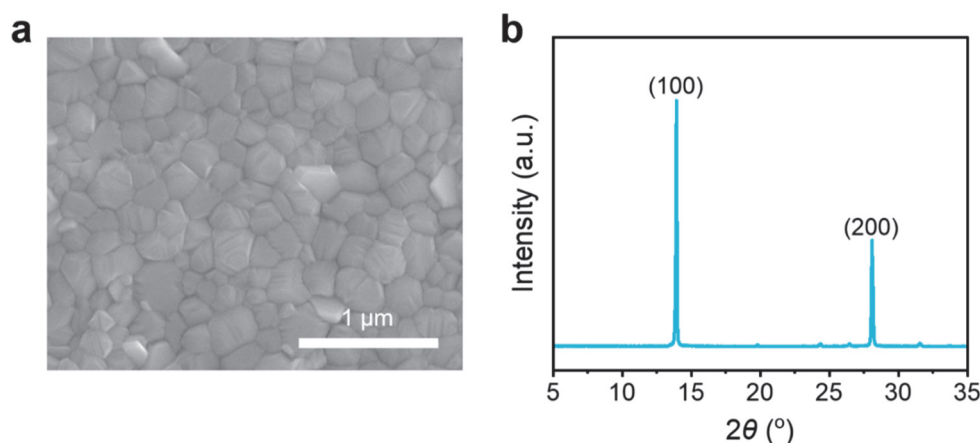


图2 钙钛矿薄膜表征

(a) 表面SEM图; (b) XRD衍射峰

1.6.2 钙钛矿/有机串联叠层光伏器件的光电转化效率和光照稳定性测试

光伏器件的性能参数包括开路电压、短路电流密度、填充因子和光电转换效率。在光照下, 器件的开路电压即为电路未连接时产生的电压。而短路电流密度则是在外部电路电压为零时, 光照下电池产生的电流密度。填充因子是电池输出功率与其开路电压和短路电流的乘积之比。光电转化效率则表示光伏器件将光能转化为电能的能力, 是最大输出功率与入射光功率的比值。通过对这些参数的了解, 我们能够有效评估钙钛矿电池的性能。

将制备的钙钛矿/有机串联叠层光伏器件进行了电流-电压特性测试, 在标准太阳光照条件下其典型性能参数如下(图3a): 开路电压为2.08 V, 短路电流密度为 $14.80 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 填充因子为74.84, 光电转换效率为23.09% (表3)。

光照稳定性对于光伏电池的长期工作稳定性至关重要, 采用国际标准的光照稳定测试(ISOS-L-2I)条件对光照稳定性进行评估: 未封装器件在开路情况下, 置于氮气环境且 $\sim 60^\circ\text{C}$ 温度下连续标准阳光照射光伏器件, 测试工作稳定性。得到的典型稳定性曲线如图3b所示, 在500 h后可保持初始效率的90%以上, 感兴趣的学生可以延长测试时间继续测试。

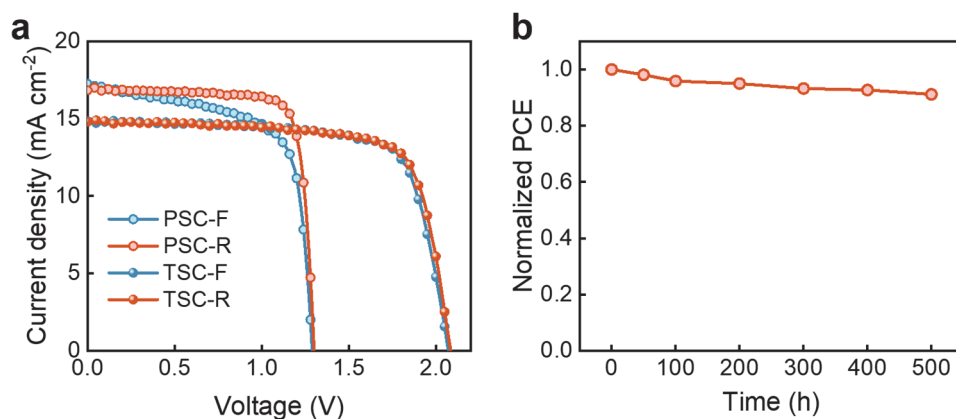


图3 串联叠层器件的电流-电压曲线(a)和光照稳定性(b)

表3 叠层器件性能参数

Sample	V_{oc}/V	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF/%	PCE/%
TSC-F	2.07	14.84	74.31	22.86
TSC-R	2.08	14.80	74.83	23.09
PSC-F	1.29	17.26	68.09	15.16
PSC-R	1.30	16.84	81.64	17.88

2 实验安排与注意事项

2.1 实验课程安排

2.1.1 前期预习准备

要求本科生自主查阅有关文献,掌握关于串联叠层器件的相关原理以及基本器件制作流程,包括匀胶机、真空蒸镀机等的使用,溶液的配制以及其他相关操作。教师在实验前提前一周发布预习任务,提交预习报告(表4)^[11]。

表4 本实验课程内容、相关成果以及时间安排之间的关系

课程内容	相关成果	课时安排	课程建议
前期预习准备	查阅有关文献、掌握相关原理、认识仪器操作,提交预习报告		提前一周进行
溶液的配制	进行各传输层材料的溶液配制、钙钛矿材料的合成与配制		提前一天进行
钙钛矿前节部分的制备	依次制备空穴传输层、钙钛矿层、钝化层、电子传输层,完成前节制备	6课时	安排在第一次实验
中间互连层的制备	进行PEI的旋涂、ITO的溅射和MoO ₃ 的蒸镀	3课时	安排在第二次实验
有机后节部分的制备	依次制备有机活性层、电子传输层和电极,得到叠层太阳能电池	3课时	实验
叠层器件性能测试	进行光电效率和长期光照稳定性测试。绘制电流-电压曲线与效率变化曲线	2课时	安排在第三次实验
钙钛矿材料的表征	对钙钛矿薄膜样品进行扫描电子显微镜和X射线衍射表征,观察晶体结构	4课时	实验
课后实验报告的撰写	提交实验报告,写出对实验数据的分析整理与对实验原理改进方案的思考		课后时间进行

2.1.2 进行实验

(1) 首先,教师讲解实验原理、实验具体流程、操作注意事项,为学生解答问题疑惑。分配实验小组,建议每组2-4人。

(2) 然后,在教师监督下,学生开展实验。关于实验准备阶段,每组成员自行分配任务,可以在

清洗导电玻璃期间配制各种所需溶液。在烘吹UVO处理期间可对溶液进行过滤等操作。

(3) 器件制备过程需按照实验方案进行,依次旋涂 NiO_x 和4PADCB制备钙钛矿空穴传输层,随后依次旋涂钙钛矿活性层和钝化层,要注意每一步的退火温度和时间。旋涂结束后,将样品转移至真空蒸镀仓进行 C_{60} 的蒸镀。然后依次旋涂PEI、溅射ITO、蒸镀 MoO_3 ,最后旋涂有机活性层溶液和电子传输层,蒸镀Ag电极即可完成串联叠层光伏器件的制备。由于器件制备流程较长、步骤较多,应当合理安排小组分工,在保证实验有序进行的前提下节省实验时间,保证每位成员都能学会每一步的操作。

(4) 最后是器件性能测试与表征:对得到的叠层器件进行光电效率测试,得到相应光电转化效率特征参数,对所得数据进行整理并绘制电流-电压曲线。对于钙钛矿薄膜样品进行扫描电子显微镜和X射线衍射表征,分析观察钙钛矿薄膜的微观结构和晶体结构特性。另外,还要对叠层器件进行长期光照稳定性测试。

2.1.3 实验成绩评估

以学生所提交的预习报告和最终实验报告为基础,结合学生在讲解问答、实验操作等环节的情况,对每个学生的操作能力、动手能力、问题解决能力等进行评价赋分,最终给出实验成绩。

2.1.4 课后分析与反馈

教师需讲解实验中出现的问题、改进实验方案与方法等,对实验报告的共性问题进行分析解答。建议学生在课后对于自己感兴趣的地方继续加深实验分析,教师积极配合学生进一步了解科研的想法,使学生对于钙钛矿叠层器件保持科研兴趣,实现指导、引领学生进行科研实验。

2.2 注意事项

1) 所有溶液的配制与旋涂均需要带好防护手套,避免有毒药品以及溶剂对皮肤身体造成伤害,实验全程也需穿好实验服。

2) 紫外-臭氧处理时需要检查通风装置是否正常运行、机器是否封闭等情况。

3) 在移液枪的使用过程中,更换不同溶液需要重新更换移液枪枪头,当枪头碰到其他可能产生污染的物品时,也需要更换枪头,保证实验溶液不被污染。

4) 在样品制备过程中,使用镊子夹取样品片子时,切忌刻划到ITO部分,以免影响器件性能。

5) 所有实验废品垃圾均要按照实验室要求分类存放,药品与仪器使用后均要归位。

3 结语

太阳能电池作为一种高效、环保的太阳能转换技术,可以大幅减少对传统化石能源的依赖,减少温室气体的排放,有助于减缓气候变化的影响,符合我国积极应对气候变化的政策要求。钙钛矿基叠层光伏器件作为一种新兴且具有无穷发展潜力的技术,近年来效率不断突破,具有极大研究意义。本课程实验取材于教师科学研究项目,其难度和创新性符合本科生阶段的发展需要,能够充分激发学生对于光电转换产业方向的科研兴趣,其中涉及到的化学知识原理以及表征测试手段可为培养学生综合创新能力奠定坚实基础。因此,此课程在综合化学设计实验的教学改革方面具有深远的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Chen, H.; Liu, C.; Xu, J.; Maxwell, A.; Zhou, W.; Yang, Y.; Zhou, Q.; Bati, A. S. R.; Wan, H.; Wang, Z.; *et al. Science* **2024**, 384 (6692), 189.
- [2] Wang, R.; Li, M.; Ma, Z.; He, Z.; Dong, Y.; Zhang, Y.; Xu, Z.; Su, G.; Tan, Z. A. *Chem. Commun.* **2023**, 59 (41), 6255.
- [3] Alberi, K.; Berry, J. J.; Cordell, J. J.; Friedman, D. J.; Geisz, J. F.; Kirmani, A. R.; Larson, B. W.; McMahon, W. E.; Mansfield, L. M.; Ndione, P. F.; *et al. Joule* **2024**, 8 (3), 658.
- [4] Su, G.; Yu, R.; Dong, Y.; He, Z.; Zhang, Y.; Wang, R.; Dang, Q.; Sha, S.; Lv, Q.; Xu, Z.; *et al. Adv. Energy Mater.* **2023**, 14 (4), 2303344.

- [5] Wang, R.; Han, M.; Wang, Y.; Zhao, J.; Zhang, J.; Ding, Y.; Zhao, Y.; Zhang, X.; Hou, G. *J. Energy Chem.* **2023**, *83* (2023), 158.
- [6] 徐利刚, 李明光, 陈润锋. 大学化学, **2023**, *38* (11), 180.
- [7] Fang, Z.; Zeng, Q.; Zuo, C.; Zhang, L.; Xiao, H.; Cheng, M.; Hao, F.; Bao, Q.; Zhang, L.; Yuan, Y.; *et al.* *Sci. Bull.* **2021**, *66* (6), 621.
- [8] Xie, Y.-M.; Niu, T.; Yao, Q.; Xue, Q.; Zeng, Z.; Cheng, Y.; Yip, H.-L.; Cao, Y. *J. Energy Chem.* **2022**, *71* (2022), 12.
- [9] Wu, S.; Yan, Y.; Yin, J.; Jiang, K.; Li, F.; Zeng, Z.; Tsang, S.-W.; Jen, A. K. Y. *Nat. Energy* **2024**, *9* (4), 411.
- [10] Dong, Y.; Yu, R.; Su, G.; Ma, Z.; He, Z.; Wang, R.; Zhang, Y.; Yang, J.; Gong, Y.; Li, M.; *et al.* *Adv. Mater.* **2024**, e2312704.
- [11] 张家浩, 李鹏伟, 李恺, 张懿强, 宋延林. 大学化学, **2023**, *39* (1), 201.