

同行专家业内评价意见书编号：20250856127

附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院） 同行专家业内评价意见书

姓名：张瀚之

学号：22260430

申报工程师职称专业类别（领域）：材料与化工

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年05月28日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

在钙钛矿太阳能电池领域，本人系统掌握了其基础理论与核心技术：

理论基础方面，深入理解钙钛矿材料的晶体结构、能带工程及光生载流子动力学机制，熟悉激子解离、电荷传输与复合等器件物理过程。

技术实践方面，精通溶液法(旋涂)薄膜制备工艺，掌握添加剂工程(氰基、酯基配位调控)、界面钝化及结晶动力学优化(原位PL)等核心技术，可针对性设计“溶剂-添加剂”协同体系以平衡缺陷修复与晶粒生长。

表征与诊断能力，熟练运用XRD、SEM分析界面化学状态，通过TRPL、TPV/TPC量化缺陷态密度与载流子寿命，结合J-V曲线、EQE、阻抗谱(EIS)解析器件性能瓶颈。

前沿动态，持续追踪钙钛矿/硅叠层电池、离子迁移抑制策略及稳定性提升(如应力释放、封装技术)等研究方向，具备跨尺度(分子-器件)的系统研究能力。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

在企业的实习期间，我深度参与材料制备、工艺优化及器件测试全流程：

1. 前驱体溶液配制：系统掌握DMF/DMSO/第三元溶剂配比优化，通过紫外-可见吸收光谱实时监控 PbI_2 -DMSO络合物稳定性，协助开发低缺陷前驱体溶液(储存周期>30天)；

2. 薄膜工艺开发：独立操作匀胶机(2000-6000 rpm)优化旋涂参数，结合退火工艺(80-150℃)调控晶粒尺寸，实现无针孔钙钛矿层(SEM验证)，粗糙度(AFM)控制在<3 nm；

3. 添加剂工程辅助：在带教指导下测试氰基/酯基/甲氧基添加剂(乙腈、 δ -GVL、3-MPN)对结晶动力学的影响；

4. 器件测试与诊断：操作太阳模拟器(AM1.5G)完成J-V曲线测试，运用Origin拟合分析效率衰减主因，协助优化空穴传输层界面接触，使小面积电池效率达到23.85%。

实习期间累计完成12组工艺对比实验，撰写5份技术周报，最终工作总结发表SCI论文1篇(一作)，熟悉了光伏测试标准与实验室安全规范。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

一、项目背景与问题定义

1. 产业化需求与挑战

钙钛矿太阳能电池因其高效率 and 低制造成本成为光伏领域的研究热点，但扩大面积制备时普遍面临效率陡降、均匀性差及稳定性不足等问题。合理调制溶剂的化学成分是实现高效钙钛矿光伏器件低成本印刷的关键前提，全面了解控制的晶体生长过程对于优化器件性能至关重要，包括溶剂-钙钛矿配位和溶解机制、中间体的形成、结晶调节、相变和缺陷控制。因此在实习期间提出新型三元溶剂体系方案，目标实现小面积器件效率 $\geq 23\%$ 、1平方厘米器件效率 $\geq 20\%$ 、稳定性=90%。

2. 问题根源分析

通过前期试产与表征，锁定以下核心问题：

溶剂挥发速率失配：传统DMF/DMSO体系在旋涂过程中因挥发速率差异(DMF: $0.35 \mu\text{L}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ，DMSO: $0.12 \mu\text{L}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)导致薄膜厚度不均；结晶失控：快速挥发导致成核密度过

高，晶粒生长受限，晶界缺陷态密度较高，器件稳定性较差；铅配位不足：DMSO虽能溶解 PbI_2 ，但其单一配位模式易形成不稳定的 PbI_2 -DMSO中间相，退火后残留碘化铅加剧非辐射复合。

二、溶剂工程解决方案设计与实施

溶剂体系重构：高沸点绿色溶剂协同设计

理论基础：溶剂与FAI之间较强的氢键可以有效降低 α -FAPbI₃生成对溶剂- PbI_2 强配键破坏的依赖，从而最终促进溶剂-钙钛矿中间体向钙钛矿晶体的转变。一般来说，最佳的平衡溶剂- PbI_2 键合强度最有利于钙钛矿前驱体中溶剂的有效萃取，同时延缓钙钛矿前驱体相分离过程中的结晶，从而控制钙钛矿的晶体质量。

策略核心：开发N,N-二甲基甲酰胺(DMF)/二甲基亚砜(DMSO)/ γ -戊内酯(GVL)三元混合溶剂体系，实现挥发动力学与配位能力的平衡。将具有低极性和高Kamlet-Taft β 值的Lewis碱溶剂 δ -戊内酯(GVL)引入DMF/DMSO混合溶剂中。利用GVL与FAI之间的强氢键，建立了溶剂- PbI_2 与溶剂-FAI相互作用的新平衡；GVL(沸点207℃)作为高沸点主体溶剂，延长湿膜操作窗口。

配比优化：通过光伏性能测试确定DMF:DMSO:GVL=7.68:2.32:1(vol%)，溶剂挥发速率梯度与旋涂速度**适配**。

三、实验验证与性能突破

1. 薄膜均匀性提升

晶粒尺寸控制：薄膜粗糙度从18.55nm降至18.19nm(AFM统计)，晶粒尺寸从311.66nm增大至371.38nm，平均效率从20.69%提高至21.74%(最高效率23.24%)；

缺陷态密度：PL强度提升为对照组的1.5倍，载流子寿命从388.63ns延长至622.58ns(TRPL测试)。

2. 器件效率与稳定性

器件效率：小面积器件冠军效率获得23.24%，一平方厘米器件冠军效率获得19.86%；

环境稳定性：25℃/N₂环境下，1000小时后效率保持率>90%；

3. 产业化经济性

成本降低：无需异构体分离，成本降低18.6%，铅耗量降低(共溶剂稀释策略)。

四、理论启示与技术创新

溶剂-溶质配位-结晶三元耦合模型：建立溶剂挥发速率、配位强度与结晶路径的定向关系，为溶剂工程设计提供预测工具；

绿色溶剂使用：GVL(生物基溶剂)替代传统有毒溶剂(GBL)，溶剂回收率>85%，符合欧盟RoHS标准。

五、总结与展望

本案例通过溶剂工程创新，为解决钙钛矿大面积制备中的效率、均匀性与稳定性难题奠定基础，推动产业化进程。

未来方向包括：

分子级溶剂设计：开发兼具高配位能力与生物降解性的单分子溶剂(如氰基酯类衍生物)；

AI驱动工艺优化：构建钙钛矿墨水数据库，训练神经网络预测最佳溶剂配比与工艺参数；

跨尺度制造技术：结合气相沉积（VCD）与溶液法，实现超大面积组件的高效制备。

该成果已发表SCI论文1篇，并成功应用于实验室研发，为钙钛矿光伏的商业化落地提供关键技术支撑。

(二)取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利（含发明专利申请）、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申请时间等	刊物名称/ 专利授权或申请号等	本人排名/ 总人数	备注
Equilibrating bonding energy between solvent and solute for optimized crystallization enables efficient perovskite solar cells	国际期刊	2024年12月30日	Journal of Materials Chemistry C	1/10	SCI期刊收录

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 85 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 83 分
本人承诺	
个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！ 申报人签名：张瀚之	

浙 江 大 学 研 究 生 院
攻读硕士学位研究生成绩表

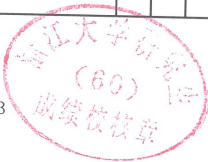
学号：22260430		姓名：张瀚之		性别：女		学院：工程师学院				专业：材料与化工				学制：2.5年	
毕业时最低应获：29.0学分						已获得：31.0学分				入学年月：2022-09				毕业年月：	
学位证书号：						毕业证书号：						授予学位：			
学习时间		课程名称		备注	学分	成绩	课程性质	学习时间		课程名称		备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期		创新设计方法			2.0	通过	专业选修课	2022-2023学年春季学期		绿色化工与生物催化前沿			2.0	90	专业学位课
2022-2023学年秋季学期		工程技术创新前沿			1.5	92	专业学位课	2022-2023学年春季学期		材料加工技术			2.0	91	专业学位课
2022-2023学年秋季学期		工程数值分析			2.0	89	专业选修课	2022-2023学年春季学期		新时代中国特色社会主义思想理论与实践			2.0	82	公共学位课
2022-2023学年秋季学期		工程伦理			2.0	90	公共学位课	2022-2023学年春季学期		研究生论文写作指导			1.0	90	专业学位课
2022-2023学年冬季学期		膜技术与工程			2.0	64	专业学位课	2022-2023学年春季学期		自然辩证法概论			1.0	85	公共学位课
2022-2023学年冬季学期		智慧能源系统工程			2.0	84	专业学位课	2022-2023学年夏季学期		研究生英语基础技能			1.0	73	公共学位课
2022-2023学年冬季学期		产业技术发展前沿			1.5	90	专业学位课	2022-2023学年春夏学期		高阶工程认知实践			3.0	88	专业学位课
2022-2023学年冬季学期		聚合物加工原理与分析方法			2.0	86	专业选修课			硕士生读书报告			2.0	通过	
2022-2023学年秋冬学期		研究生英语			2.0	90	公共学位课								

说明：1. 研究生课程按三种方法计分，百分制、两级制（通过、不通过）、三级制（优秀、良好、及格）。

说明：1. 研究生课程按三种方法计分：百分制，两级制（通过、不通过），五级制（优、良、中、及格、不及格）。

2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章：
成绩校核人：张梦依
打印日期：2025-06-03



Cite this: *J. Mater. Chem. C*, 2025, **13**, 4112

Equilibrating bonding energy between solvent and solute for optimized crystallization enables efficient perovskite solar cells†

Hanzhi Zhang,^a Weihui Bi,^a Jin Wang,^{a,b} Peng Mao,^b Jun Lv,^{b,c} Shen Xing,^d Po-Chuan Yang,^e Guangtong Hai,^f Gaorong Han^a and Yufei Zhong^{a,*}

Low-cost solution processing has enabled perovskite solar cells to rapidly improve their efficiency. However, the uncontrolled morphology of the photoactive layer hinders their further enhancement. Specifically, the solvent–solute interactions in the precursor solution lead to a special stage during film formation, namely the solvate phase, playing a vital role in determining the quality of perovskites via subsequent phase transitions. We herein investigate the impact of host/guest solvent systems on the crystallization of photovoltaic perovskites and their corresponding effect on device figures of merit. In particular, we found that the barrier of the dominating phase transformation process could be manipulated by balancing the interaction of solvent–PbI₂ and solvent–FAI. Additionally, we reveal that the strong binding energy between the solvent and PbI₂ restrains solvent evaporation at the bottom of the perovskite crystals, leading to the presence of voids during annealing. Enhanced solvent–FAI intermolecular interactions, combined with the improved miscibility between the solvent component and antisolvent could facilitate the extraction of solvents from the saturated perovskite precursor solution, avoiding the formation of voids. By systematically manipulating the above processes, we obtained an optimized morphology with enhanced crystal quality with device efficiency increasing from 22.06% to 23.24%. We believe the simple methodology presented here provides new insights into understanding the solution–solid transitions of photovoltaic perovskites.

Received 7th December 2024,
Accepted 27th December 2024

DOI: 10.1039/d4tc05165c

rsc.li/materials-c

Introduction

Perovskite photovoltaics are propelling the advancement of third-generation thin-film photovoltaic technologies, achieving a remarkable certified efficiency of 26.7% through a solution-processed approach.^{1,2} In this approach, rational modulation of the solvent's chemical composition is a crucial prerequisite

for the low-cost printing of efficient perovskite photovoltaic devices.^{3–7} Additionally, comprehensive understanding of the diffusion-controlled crystal growth process is essential for optimizing device performance, including the mechanisms of solvent–perovskite coordination and dissolution, formation of intermediates, crystallization regulation, phase transition, and defect control.^{8–11}

The exploration of solvent engineering has fortunately afforded researchers a significant understanding of the interactions between solvents and perovskites. Currently, the most commonly employed solvent system for the fabrication of high-efficiency solar cells comprises a Lewis base mixture of dimethylformamide (DMF) and dimethyl sulfoxide (DMSO).^{12,13} Within this mixture, DMF already partially forms strong hydrogen bonds with FA⁺ and exhibits coordination with Pb²⁺, while DMSO demonstrates a strong coordinating interaction with Pb²⁺, leading to the formation of a stable intermediate phase (PbI₂·DMSO).¹⁴ This interaction enhances the solubility of inorganic lead salts, effectively improves the uniformity of stoichiometric nucleation and delays crystallization during phase separation of the precursor solution, thus ultimately enlarging the grain size of the perovskite.¹⁵ However, the crystallization of the perovskite precursor occurs from the surface to the bottom.

^a Zhejiang Engineering Research Center for Fabrication and Application of Advanced Photovoltaic Materials, Institute for Carbon Neutrality, Ningbo Innovation Centre, Zhejiang University, Ningbo, 315048, P. R. China^b Zhejiang Engineering Research Center for Fabrication and Application of Advanced Photovoltaic Materials, School of Materials Science and Engineering, NingboTech University, No. 1 Qianhu South Road, Ningbo, 315100, P. R. China. E-mail: wjlin@nit.zju.edu.cn, yufei.zhong@nit.zju.edu.cn^c Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210008, P. R. China^d Dresden Integrated Center for Applied Physics and Photonic Materials (IAP) and Institute of Applied Physics, TU Dresden, Nöthnitzer Str. 61, 01187 Dresden, Germany^e RISEN Energy Co., Ltd., China^f College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China† Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: <https://doi.org/10.1039/d4tc05165c>

‡ Hanzhi Zhang and Weihui Bi contributed equally to this work.

经检索《Web of Science》和《Journal Citation Reports (JCR)》数据库,《Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)》收录论文及其期刊影响因子如下。(检索时间:2025年3月24日)

第1条,共1条

标题:Equilibrating bonding energy between solvent and solute for optimized crystallization enables efficient perovskite solar cells

作者:Zhang, HZ(Zhang, Hanzhi);Bi, WH(Bi, Weihui);Wang, J(Wang, Jin);Mao, P(Mao, Peng);Lv, J(Lv, Jun);Xing, S(Xing, Shen);Yang, PC(Yang, Po-Chuan);Hai, GT(Hai, Guangtong);Han, GR(Han, Gaorong);Zhong, YF(Zhong, Yufei);

来源出版物:JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY C 卷:13 期:8 页:4112-4118 提前访问日期:DEC 2024 DOI:10.1039/d4tc05165c 出版年:FEB 20 2025

入藏号:WOS:001395877500001

文献类型:Article

地址:

[Zhang, Hanzhi; Bi, Weihui; Han, Gaorong] Zhejiang Univ, Inst Carbon Neutral, Zhejiang Engn Res Ctr Fabricat & Applicat Adv Phot, Ningbo Innovat Ctr, Ningbo 315048, Peoples R China.

[Wang, Jin; Mao, Peng; Lv, Jun; Zhong, Yufei] NingboTech Univ, Zhejiang Engn Res Ctr Fabricat & Applicat Adv Phot, Sch Mat Sci & Engr, 1 Qianhu South Rd, Ningbo 315100, Peoples R China.

[Lv, Jun] Nanjing Univ, Nanjing 210008, Jiangsu, Peoples R China.

[Xing, Shen] Tech Univ Dresden, Dresden Integrated Ctr Appl Phys & Photon Mat IAPP, Nothnitzer Str 61, D-01187 Dresden, Germany.

[Xing, Shen] Tech Univ Dresden, Inst Appl Phys, Nothnitzer Str 61, D-01187 Dresden, Germany.

[Yang, Po-Chuan] Risen Energy Co Ltd, Ningbo, Peoples R China.

[Hai, Guangtong] Zhejiang Univ, Coll Chem & Biol Engr, Hangzhou 310027, Peoples R China.

通讯作者地址:

Wang, J; Zhong, YF (corresponding author), NingboTech Univ, Zhejiang Engn Res Ctr Fabricat & Applicat Adv Phot, Sch Mat Sci & Engr, 1 Qianhu South Rd, Ningbo 315100, Peoples R China.

电子邮件地址:wjin@nit.zju.edu.cn; yufei.zhong@nit.zju.edu.cn

IDS号:X5S7Q

ISSN:2050-7526

eISSN:2050-7534

期刊《Journal of Materials Chemistry C》2023年的影响因子为5.7,五年影响因子为6.0。

注:

1. 期刊影响因子及分区情况最新数据以JCR数据库最新数据为准。
2. 以上检索结果来自CALIS查收查引系统。
3. 以上检索结果均得到委托人及被检索作者的确认。



教育部科技查新工作站
检索人(签章)

2025年3月24日

