

文章编号: 1000-7032(2025)11-2150-14

薄膜太阳能电池缺陷成像方法应用研究进展

王 伟^{1,2}, 洪家骏², 武 娜², 林 剑², 刘 瑞^{1*}, 马昌期^{2*}

(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212100;

2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 i-Lab & 印刷电子技术研究中心, 江苏 苏州 215123)

摘要: 在全球能源转型加速的当下, 纳米薄膜太阳能电池, 包括有机光伏电池(OPV)和钙钛矿太阳能电池(PSC), 因其效率高、成本低、制作简便而受到广泛关注。目前, 单结有机太阳能电池的实验室最高转换效率已经超过20%, 钙钛矿最高转换效率也已超过26%。本文从OPV和PSCs的结构出发, 总结了电池中电极、传输层和光活性层的主要功能。在此基础上, 介绍了常见的微区缺陷成像原理与方法, 包括光致发光(PL)、电致发光(EL)、激光束诱导电流成像(LBIC)、锁相热成像(LIT)等, 总结了这些方法在OPV和PSCs失效过程研究及大面积均匀性表征中的最新应用进展。最后, 指出了目前微观缺陷成像测试的不足以及未来的发展方向。本文为新型纳米薄膜太阳能电池的微观缺陷成像方法与应用提供了一个较为全面的介绍。

关键词: 有机光伏电池; 钙钛矿光伏电池; 缺陷成像; 失效机制; 均匀性分析

中图分类号: TM914.4 文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250058 CSTR: 32170. 14. CJL. 20250058

Research Progress in Defect Imaging Methods for Thin Film Solar Cells

WANG Wei^{1,2}, HONG Jiajun², WU Na², LIN Jian², LIU Rui^{1*}, MA Changqi^{2*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China;

2. i-Lab & Printed Electronics Research Center, Suzhou Institute of Nanotech and Nano-Bionics,

Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

* Corresponding Authors, E-mail: liuruicxz@126.com; cqma2011@sinano.ac.cn

Abstract: In the context of accelerated global energy transition, nano-thin-film solar cells, including organic photovoltaic cells (OPVs) and perovskite solar cells (PSCs), have garnered widespread attention due to their high efficiency, low cost, and ease of fabrication. Currently, the laboratory-recorded power conversion efficiency (PCE) of single-junction OPVs has surpassed 20%, while that of PSCs has exceeded 26%. This paper begins with an overview of the structures of OPVs and PSCs, summarizing the primary failure mechanisms of these cells, focusing on electrodes, charge transport layers, and photoactive layers. Subsequently, it outlines common micro defect imaging principles and methods, including photoluminescence (PL), electroluminescence (EL), laser beam-induced current imaging (LBIC), and lock-in thermography (LIT). The paper reviews the latest advancements in micro-defect imaging and the homogeneity research for OPVs and PSCs, highlights current limitations in micro-defect imaging, and suggests future development directions. This paper provides a comprehensive overview of the micro-defect imaging methods and applications for nano-thin-film solar cells.

Key words: organic photovoltaic cells; perovskite solar cells; micro-area defect imaging; failure mechanisms; homogeneity analysis

收稿日期: 2025-04-29; 修订日期: 2025-05-19

基金项目: 中国科学院科研仪器装备项目(YJKYYQ20180029); 中国科学院特别研究助理计划(E3551302)

Supported by Scientific Equipment Research Project of Chinese Academy of Sciences (YJKYYQ20180029); Chinese Academy of Sciences Special Research Assistant Program (E3551302)

1 引 言

随着社会工业化程度的提高,对于能源的需求迅速增加。与其他可再生能源相比,太阳能因其来源广泛、成本低廉、适用性强等特点,已成为当今能源结构的重要组成部分^[1]。早在十七世纪,法国科学家 E. Becquerel 首次发现了光伏效应,即物体在受到辐射光后,材料中电荷变化而产生电势差和电流^[2]。经过了一百多年时间的发展,1954 年,美国贝尔实验室完成了世界上第一块硅太阳能电池,其光电转换效率为 6%^[3]。此后,研究人员对太阳能电池技术进行了系列深入研究,在新材料、新结构、工作原理等方面取得了长足的进展,器件效率一再提升。与此同时,光伏电池的成本、工艺等方面也取得了巨大的进展,太阳能电池实现了大规模应用。根据太阳能电池材料的不同,常见的太阳能电池可以分为以晶体硅为原料的单晶硅和多晶硅太阳能电池^[4],以砷化镓(GaAs)、碲化镉(GdTe)和铜铟镓硒(CuInGaSe)为代表的第二代薄膜太阳能电池^[5-6]。近些年来,基于有机、钙钛矿及量子半导体材料的第三代薄膜太阳能电池在效率方面也获得了巨大突破,引起了广泛的关注^[7]。

由于有机及钙钛矿材料均可以溶液法制备,且材料易得,器件具有本征柔性等优点^[8-9],成为新一代光伏技术的引领者。目前,有机及钙钛矿太

阳能电池的实验室最高转换效率分别超过 20% 及 26%^[10-11]。随着电池器件效率的提升,大面积制备和稳定性成为研究焦点。本文将从有机和钙钛矿太阳能电池的大面积均匀性和稳定性研究需求出发,总结有机及钙钛矿电池器件各层材料和界面中缺陷的类型及特征,进一步介绍目前用于表征器件中微区缺陷的成像分析方法。概述了这些缺陷成像分析方法在新型薄膜光伏电池大面积均匀性及稳定性方面的研究进展,并对该类成像分析方法的发展趋势进行了展望。

2 有机和钙钛矿太阳能电池工作原理及结构特征

2.1 有机和钙钛矿太阳能电池结构

有机及钙钛矿电池都采用一种三明治式结构,即具有光电响应的有机及钙钛矿半导体层被夹在透明底电极和不透明的金属顶电极中间(图 1)。在实际的电池器件中,通常在两个电极与光电响应的活性层中引入电极界面层来改善电池中的电荷注入与提取效率。其中,有机太阳能电池通常采用本体异质结(Bulk heterojunction, BHJ)结构^[12],即所用的有机光电活性层由具有给电子特性的半导体材料共混,形成纳米尺度的异质结结构。而钙钛矿太阳能电池中,具有光电响应的活性层由具有 ABX_3 结构的钙钛矿半导体材料组成^[13-14]。

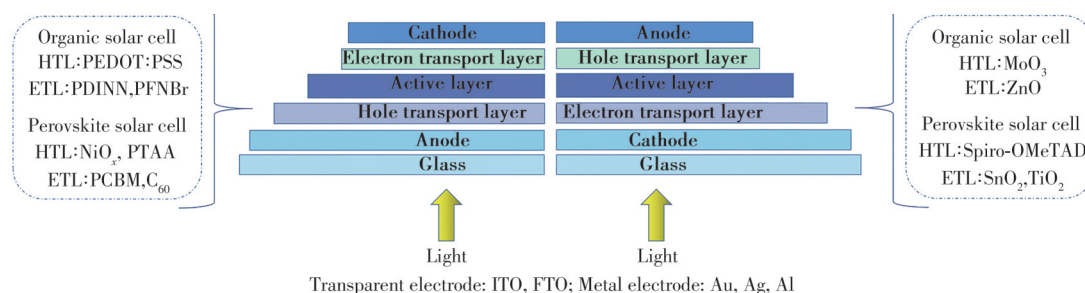


图 1 三明治式结构的有机及钙钛矿电池,左侧为 p-i-n 型结构,右侧为 n-i-p 型结构

Fig.1 The device structure of organic and perovskite solar cells. left: a p-i-n structure, right: an n-i-p structure

根据其电极位置和功能层的排列顺序,有机及钙钛矿太阳能电池可以分为 p-i-n 及 n-i-p 型电池。依据太阳光从透明底电极入射的方向排列,p-i-n 型电池结构为:透明底电极-空穴传输层(p-型半导体界面层)-活性层-电子传输层(n-型半导体界面层)-金属顶电极(图 1 左)。而 n-i-p 型电池则具有相反的排序结构(图 1 右)。需要指出的是,p-i-n 及 n-i-p 型结构的有机太阳能电池通常也分别被称

为正置和倒置结构电池,而钙钛矿太阳能电池则恰好相反。读者在阅读文献时需要留意区分。

2.2 有机和钙钛矿电池各功能层

在光伏器件中,光活性层是决定电池性能的最重要因素。电池通过光活性层吸收光子并将其转化为可自由移动的载流子。有机太阳能电池中,活性层材料分为给体型有机半导体材料和受体型有机半导体材料。常见的给体材料有共轭聚合物

材料,而常见的受体材料为富勒烯或者具有 A-D-A 结构的共轭小分子材料^[15]。钙钛矿电池则利用钙钛矿半导体材料吸收太阳光子并产生电荷,完成光电转换^[16]。钙钛矿材料一般表示为 ABX_3 ,其中 A 和 B 是两种不同的金属离子, X 是卤素离子(如碘、溴、氯等)^[17]。

除了活性层以外,电池两端为两个电极,其作用在于收集器件内部产生的电荷,并与外电路形成连接形成回路。有机和钙钛矿电池所采用的电极基本一致,入光侧透明电极通常为透明导电氧化物(TCO),如氧化铟锡(ITO)或氟掺杂氧化锡(FTO)等,背侧金属电极则通常为 Al、Ag、Au 等。金属电极的厚度通常在 100 nm 左右^[18-19]。

电极界面层的主要作用是收集和传输载流子(电子或空穴),同时阻挡另一种载流子的反向流动。因此,电极界面层材料需要有合适的功函数和能级,并与电极和活性层形成良好的物理接触。在有机太阳能电池领域,常用的空穴传输层(Hole transport layer, HTL)材料为 MoO_3 、PEDOT:PSS,而电子传输层(Electron transport layer, ETL)则包括 PDINN、 ZnO 等^[20]。对于钙钛矿电池,其空穴传输层则常采用 Spiro-OMeTAD、PTAA、 NiO_x 等,而电子传输层通常选择 TiO_2 、 SnO_2 、 C_{60} 及其衍生物等^[21]。

3 缺陷成像技术原理综述

3.1 缺陷成像原理与方法

从上节的论述中可以得出结论:有机和钙钛

矿电池的电极、界面层、光活性层会出现缺陷将导致器件性能下降。对器件中的缺陷进行直接成像观察,有助于理解电池器件的均匀性及器件的失效机制。因此,薄膜光伏电池缺陷成像分析方法对于该类电池的大面积均匀性以及稳定性研究具有十分重要的意义。针对这一研究需求,结合薄膜光伏电池光电响应特征,多种光电成像技术被用于光伏电池缺陷的成像分析,包括光致发光(Photoluminescence, PL)、电致发光(Electroluminescence, EL)、激光束诱导电流(Laser beam induced current, LBIC)以及锁相热成像(Lock-in thermal imaging)等。以下将对这些成像方法原理以及应用进展进行总结。

3.1.1 光致发光(PL)缺陷成像方法

光致发光(PL)是冷发光的一种,指物质吸收光子后重新辐射出光子的过程(图 2(a))^[22]。当物质吸收光子后,其内部的电子会从基态跃迁到激发态,处于激发态的电子不稳定,在返回基态时会以光子的形式释放出能量。一般来说,具有更低缺陷态密度的半导体薄膜具有更高的发光效率及载流子寿命。因此,对电池器件活性层薄膜中受光发射的发光波长、强度及寿命进行扫描可以获得器件薄膜缺陷态的分布情况,实现对缺陷成像。需要指出的是,PL 测试要求被测薄膜具有较好的发光性能。因此,PL 成像在钙钛矿薄膜的缺陷成像分析应用比有机电池中要更多^[23]。

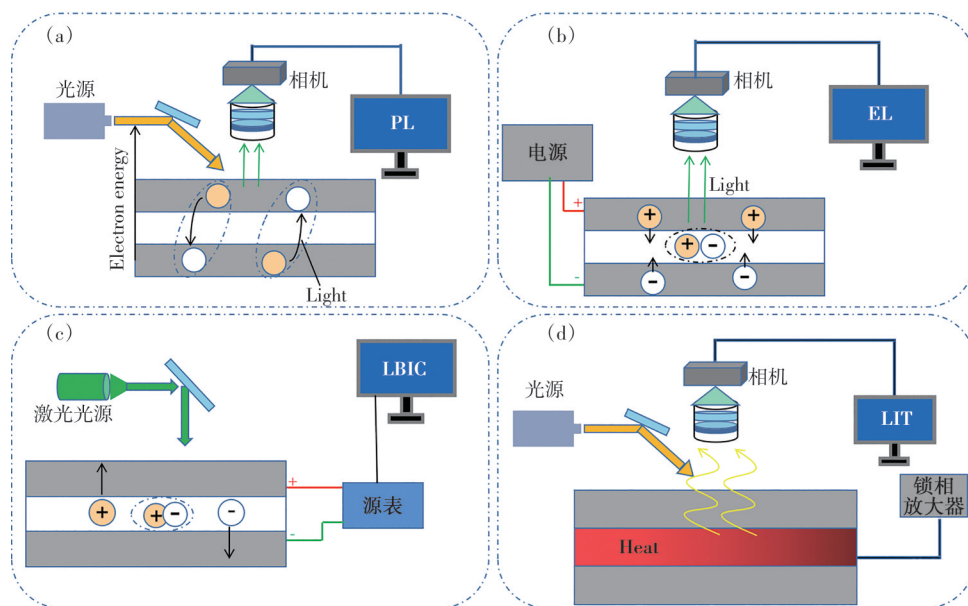


图 2 常见的缺陷成像方法原理:(a)PL 成像;(b)EL 成像;(c)LBIC 成像;(d)LIT 成像

Fig.2 Working principle of PL (a), EL (b), LBIC (c), and LIT (d) imaging tests

19 世纪,Stokes 在研究荧光现象时发现了光致发光现象,并探究了其现象的物理机制。20 世纪末,PL 成像被应用于光伏器件的研究中^[24],此后迅速发展。尤其是近年来,随着钙钛矿电池研究受到全球科研界的高度关注,PL 成像技术在光伏领域的应用也得到了前所未有的深度拓展与广泛应用,为光伏材料与器件的性能评估、缺陷分析等研究工作提供了有力的技术支撑^[25]。

3.1.2 电致发光(EL)缺陷成像方法

电致发光(EL)原理是向太阳能电池中施加一定的电压,向电池内注入电荷,使得电池内部的电子和空穴复合并发出光子,利用高灵敏度相机(如近红外增强 CCD 相机)捕捉这些光信号,形成 EL 成像结果(图 2(b))^[26]。

由于不同能量的空穴和电子复合时释放的能量不同,进而发出不同波长的光子^[27],从而通过各个位置发光的区别分析电池可能出现的问题。同时,发光的强度与注入的电荷数量以及材料的缺陷密度等相关。与 PL 不同,EL 是需要外部注入的电荷复合形成发光。因此,EL 还能够表征器件中电荷注入与复合差异^[28],因而是表征器件表界面电荷注入特性缺陷的一种有效方法,应用非常广泛。

EL 现象最早于 1907 年被发现,但是应用于光伏领域则要晚得多。2005 年,Uraoka 研究团队使用 PL 测试技术,发现多晶硅太阳能电池中少数载流子的对应关系^[29],建立了缺陷(裂纹、断栅)与发光强度的关联模型。从此以后,EL 成像迅速发展并被应用于硅基电池的检测中。

3.1.3 激光诱导电流(LBIC)缺陷成像方法

激光诱导电流成像(LBIC)技术是通过光学显微物镜或近场光探针将激光光斑缩小到微米尺度,对器件进行局域光激发(图 2(c))^[30]。测试过程中,光激发样品中的电子跃迁,使其产生光生载流子,进而在样品内部形成电流,即光电流。该电

流的大小与样品在该位置的光电响应能力相关。光束诱导电流成像方法能够直观并且精确地测试出光生电流大小,通过二维扫描可以将器件中的光生电流成像,进而将器件中的缺陷特性清晰地呈现出来。由于该方法直接测试电池在光照条件下的器件电流输出,因此可以对器件表界面以及活性层缺陷进行直观表征。因此,LBIC 是研究太阳能电池光吸收和电荷产生微区特性的直接且理想的方法。

早在 21 世纪初,LBIC 就被用在硅电池的探测研究中,成功测出光伏电池活性区域^[31]。随着光电器件的迅速发展,LBIC 也得到了重视并被广泛使用。

3.1.4 其他缺陷成像分析方法

锁相热成像技术(LIT)是通过对器件两端施加偏置电压或电流,电池内部因电阻不同产生温度差异,利用红外(IR)相机检测器件表面因温度上升而发出来的长波信号(图 2(d)),并结合锁相技术滤除噪声,从而生成高分辨率的热图像的方法^[32]。该方法具有很高的灵敏度和空间分辨率,是检测器件内部微小短路位点的有效方法。

根据器件成像过程中是否引入偏置光,锁相热成像缺陷探测技术又被分为暗场(DLIT)和亮场锁相热成像(ILIT)两种。其可以分别给出器件在暗态及光照条件下器件内部的短路位点信息。2000 年左右,LIT 才被系统地应用于光伏电池器件缺陷的分析探测上^[33]。从此以后,热成像被广泛应用于热缺陷探测研究中^[34]。

3.2 缺陷成像方法总结

表 1 对比了不同成像方法的优缺点和适用范围,可以看出,四种成像方法在原理、优缺点和适用范围方面各有特点。总体而言,EL 成像在硅电池裂纹、破裂探测应用较多,而 LIT 多用于探测短路缺陷。PL 和 LBIC 在缺陷分辨率方面表现更优,且操作简便。然而,PL 测试对材料发光有要

表 1 不同缺陷成像方法对比
Tab. 1 Comparison of different defects imaging methods

成像方法	原理	优缺点	适用范围
PL	特性波长激发材料,检测材料受激发光	分辨率高,无损伤;设备昂贵	电池中半导体活性层内部缺陷
EL	对器件输入电压,检测电荷注入活性层并发光	缺陷对比明显,可检测电荷注入缺陷;设备昂贵	多用于电池中裂纹及电荷传输界面缺陷
LBIC	激光照射电池样品,采集电池内部产生光电流	直接检测光电转换过程缺陷,分辨率高;需精确控制系统	适用所有光伏电池,可测试材料与界面缺陷
LIT	对电池两端加载电场,电池内部电阻不同产生温度差异,得到电池内部电阻信息	测试器件内部因电阻差异而引起的发热差异,分辨率高;设备复杂	测试器件内部短路缺陷,适用于各类电池

求, LBIC 则无此要求, 可更直观地展现器件的光电特性。在这四种成像方法中, LBIC 凭借其广泛的适用性和高分辨率, 在多种光伏电池检测中展现了较好的综合性能, 是最为突出的成像测试方法。

4 成像技术在有机与钙钛矿太阳能电池中的应用分析

4.1 有机光伏电池微区缺陷成像应用分析

目前, 有机光伏器件多采用溶液法制备, 溶液法制备工艺虽赋予有机太阳能电池低成本、可大面积加工等优势, 却不可避免地引入了薄膜不均匀性和缺陷分布随机性问题, 成为制约大面积器件效率与稳定性的瓶颈^[35-36]。通过微区缺陷成像技术对电池二维平面内的缺陷分布与局域光电特

性进行精准关联分析, 可为揭示“缺陷-性能”构效关系、指导工艺优化和结构设计提供科学依据^[37]。近年来, 前文所述的微区扫描技术的快速发展推动该领域从传统的体相性能研究向“微纳尺度缺陷工程”研究等的转变, 成为突破大面积器件均一性及稳定性难题的重要研究方向^[38-39]。

当器件存在缺陷时, 光生电流的产生和传输过程受到阻碍, 进而导致光生电流能力显著降低。而 LBIC 成像方法可以直观地反映器件不同区域光生电流能力的变化情况, 因此常被用来研究缺陷的具体影响程度。为了更好地理解微区缺陷光电特征, Wood 团队将直径为 9 μm 的 SiO_2 颗粒掺入活性层溶液^[40], 模拟灰尘颗粒对光伏器件的影响。图 3(a) 为器件中 SiO_2 形成的缺陷示意图, 图

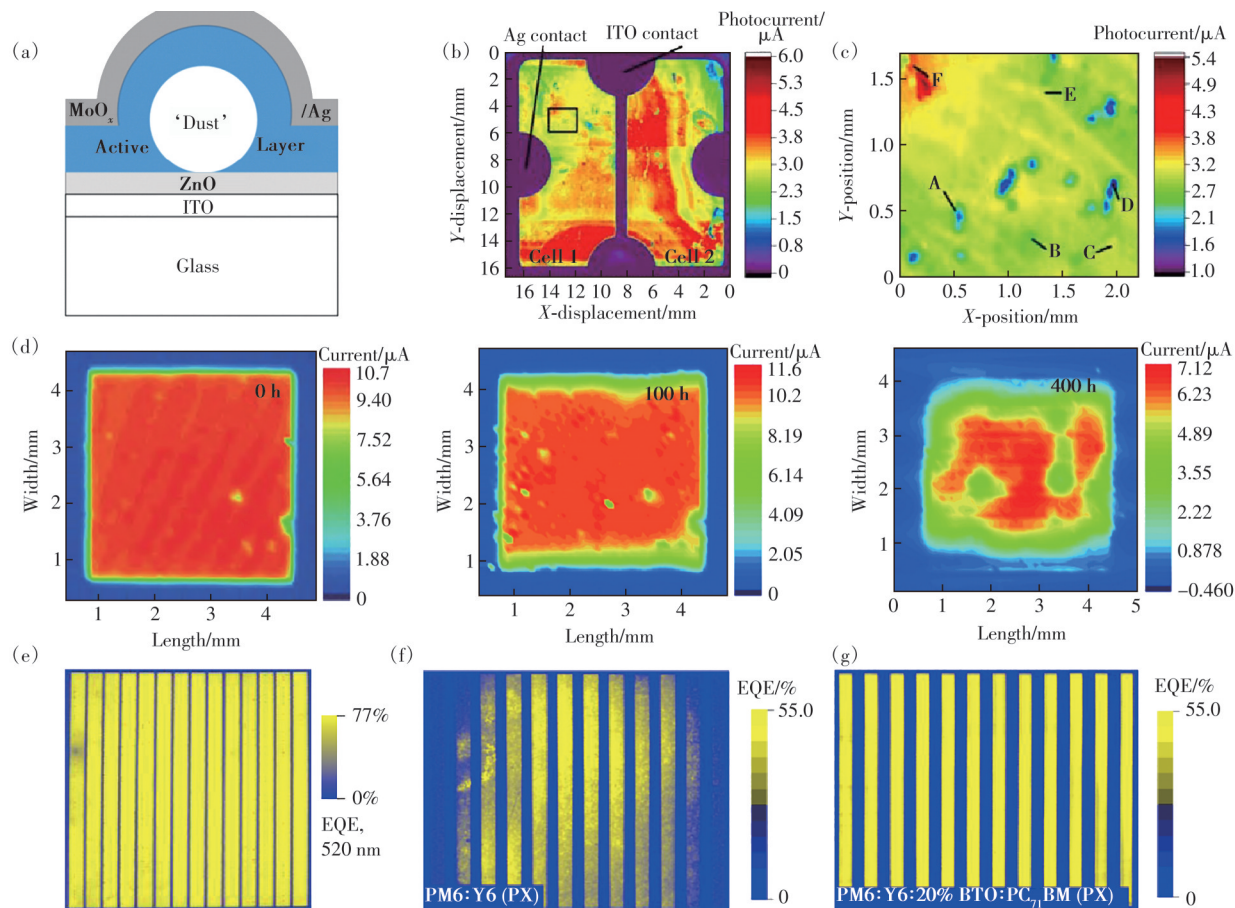


图 3 (a)纳米 SiO_2 在有机电池中的微区结构示意图; 包含 SiO_2 纳米粒子的器件 LBIC 成像(b)及方框局部放大结果(c)^[40]; (d)结构为 P3HT:PC₆₁BM 的有机电池 UV 胶封装后老化 0 h、100 h 和 400 h 的 LBIC 成像结果^[41]; (e)大面积柔性有机太阳能电池模组 (41 cm²) LBIC 成像结果^[42]; 基于 PM6:Y6(f)和 PM6:Y6:20%BTO:PC₇₁BM(g)的大面积有机薄膜光伏电池组件的 LBIC 成像对比结果^[43]

Fig.3 (a) Schematic diagram of the SiO_2 nanoparticle in an organic solar cells. LBIC test results of the entire device(b) and the zoom-in image(c). (d) The LBIC images of UV glue encapsulated P3HT:PC₆₁BM cells aged for 0 h, 100 h, and 400 h. (e) LBIC image of flexible solar module (41 cm²). LBIC images of the solar module based on PM6:Y6 without (f) or with 20% BTO (g)

3(b)、(c)给出了器件整体以及局域 LBIC 成像结果。从图中可以看出,电池的光电转换有显著的不均匀性。深入分析可以发现,区域 A、B 和 D 的微区电流分别降低了 41%、21% 和 71%,而区域 C、E 和 F 则分别增加了 7%、6% 和 84%。前者被认为是 SiO₂ 的绝缘性造成电流提取下降,而后者则被认为是微米 SiO₂ 的光散射效应。这一研究表明, LBIC 可以为微区缺陷提供一种非常有效的成像分析方法。

作者团队联合太原理工大学杨永珍团队利用 LBIC 成像方法研究了 UV 胶封装对结构 ITO/ZnO/P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine/MoO₃/Al 的有机电池的稳定性影响^[41]。令人意外的是,未封装器件在 N₂ 环境中老化 400 h 后,光电转换效率(PCE)仍保持初始值的 90% 以上;而 UV 胶封装器件在相同条件下老化 400 h 后, PCE 衰减至初始值的 5%。LBIC 成像结果表明, UV 胶封装器件随着老化时间的延长出现了边缘光电流的显著下降(图 3(d)),表现出典型的沿金属电极边缘扩散的失效特征。结合器件 *J-V* 特性变化分析确定,器件失效主要源于 UV 胶在光照射下产生质子酸沿金属电极扩散,导致 MoO₃ 层失效。这一结果说明封装胶层对于封装后的 OPV 器件性能有重要影响,需要慎重测试选择。从这项研究看出, LBIC 可以作为器件性能衰减更直接的结果。

基于对缺陷进行定位表征的能力,这些光电成像分析方法也可用于电池均匀性的表征,特别是 LBIC 测试成像方法。例如,华中科技大学周印华课题组利用 LBIC 测试成像方法对结构为 Ag-NWs-em-PVA/PEI-Zn/PM6: BTP-eC9/MoO₃/Ag 电池模组进行了 LBIC 成像(图 3(e))^[42]。从中可以看出,该柔性模组各位置处电流强度均匀,展示出很好的器件性能。苏州大学李永舫研究团队对比了不同活性层结构的有机电池模组的 LBIC 成像。结果表明,基于 PM6:Y6:20%BTO:PC₇₁BM 的组件(图 3(g))较基于 PM6:Y6(图 3(f))的组件呈现出更均匀的光电流分布^[43]。这表明, BTO 分子在提升器件均匀性方面具有显著优势,与测试得到的模组效率结果一致。可以看出, LBIC 测试方法在表征大面积模组光电流均匀性方面有着其独特的优势。

除了以上实例, LBIC 测试方法在有机光伏器件中也有其他应用。Jørgensen 团队通过采用激

光束诱导电流(LBIC)成像技术,对比研究了印刷有机光伏电池中不同油墨印刷电极的导电特性^[44]。在大面积有机太阳能电池研究中, LBIC 成像方法常被用来探测器件的光电流均匀性^[45-47]。例如,李永舫团队通过 LBIC 结果比较大于 10 cm² 模组的光电流均匀性^[48];并使用 LBIC 成像方法说明面积 16.8 cm² 模组的光电流均匀性,模组效率达到 18.36%^[49]。

另外,其余成像方法也应用广泛。Matheron 团队通过 EL 成像技术,探究出 EL 亮度与子电池的并联电阻 R_{sh} 呈反比,从而得到定位串联有机电池模组中缺陷子电池的方法^[50]; Distler 团队则使用 EL、PL 和 DLIT 结果说明器件稳定性优越^[51]。

光伏器件中,不同位置缺陷在电致发光特性、光致发光、光热特性会有所区别,导致在 EL、PL、LIT 成像的结果也有所变化。为了更好地理解不同类型缺陷的成像特征规律,研究人员通过在器件中主动引入人为缺陷,并利用不同扫描成像分析方法,探究不同成像结果的区别。Karl 团队通过使用激光烧蚀方法在结构为 ITO/ZnO/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag 的器件 ZnO 层和活性层中引入缺陷,并对比其缺陷成像差异^[52]。图 4(a)为 ZnO 电子传输层中引入缺陷示意图及其 EL、PL 和 DLIT 成像结果。从图中可以发现, ETL 的缺陷对器件的 PL 仅造成微弱的发光强度下降,但其 EL 及 DLIT 成像中缺陷位置 EL 发光强度及 LIT 热成像强度显著下降。这表明, EL 及 LIT 测试对 ETL 的缺陷有着更显著的检出能力。图 4(b)为活性层缺陷结构示意图及相应的 EL、PL 以及在 +1 V 偏压下的 DLIT 成像结果。从图中可以看出,活性层缺陷在 EL 和 PL 成像中呈现一个强度下降的黑点;而在 DLIT 成像中,缺陷呈现出显著亮点,这是由于活性层缺失导致上下电极短路,器件热量聚集显著。有意思的是,在正向偏压(+1 V)下,除了缺陷点的温度上升外,器件整体也有温度上升,这可以认为是正向偏压时有电流流过其余区域,这一结果也和 EL 整体有发光结果一致。

随后,该团队进一步使用缺陷成像技术对子电池分别为 P3HT:PC₆₁BM 和 pDPP5T-2:PC₆₁BM 的有机叠层电池的缺陷成像特征进行了研究分析^[53]。图 4(c)为在底电池的 ETL 和顶电池的 HTL 中同时引入缺陷的 EL、DLT 和 PL 成像结果,其中

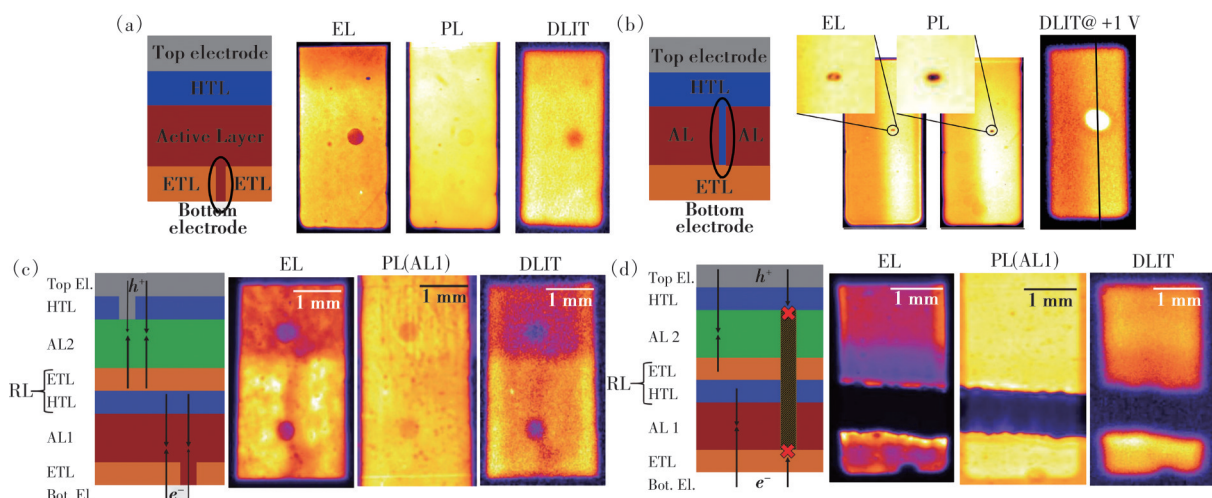


图4 器件不同缺陷及对应 EL、PL、DLIT 成像结果。(a)ZnO 缺陷;(b)活性层缺陷^[52];(c)HTL 和 ETL 缺陷;(d)叠层电池复合层 HTL^[53]

Fig.4 Device defects and corresponding imaging results. (a)ZnO defects. (b)Active layer defects^[52]. (c)HTL and ETL defects. (d)Defect of the recombination layer of the tandem cell^[53]

PL(AL1)为器件由 532 nm 激光(主要是激发前结 P3HT:PCBM 子电池)激发成像结果。从实验结果可以看出,缺陷处的 EL 和 DLIT 信号强度均降低,相比之下,PL 成像中缺陷发光强度降低幅度较 EL 和 DLIT 更小。

作者进一步研究了对中间复合层(RL)引入缺陷时的成像情况。需要指出的一点是,由于该位置很难通过激光来制造缺陷,作者利用胶带撕去 PEDOT:PSS 层的方法来制造缺陷。图 4(d)为器件缺陷示意图以及对应的成像特征。有意思的是,这一器件的 EL 和 DLIT 图像在缺陷位置完全没有显示信号,这表明该区域完全处于非活动状态。这意味着中间层缺陷不会直接导致器件短路,而是导致这一区域失活。此外,底部活性层的 PL 信号在缺陷位置显著猝灭,而顶部活性层的 PL 发光信号则产生了明显增强。推断这是由于 PEDOT:PSS 的去除使得底部的活性层被上层溶液清除,从而导致发光失活。在缺陷处,这种差异表现得尤为显著。

Karl 团队的上述结果证明,多种成像方法联合使用可以实现对叠层电池中不同位点的缺陷进行差别成像,是鉴定缺陷类型与位点的一种有效方法,具有十分重要的意义。类似的研究并不少见,Matheron 团队通过胶带及激光蚀刻在有机光伏器件中人工引入缺陷,并利用不同的成像方法对器件中的不同位置缺陷进行表征分析,探究不同位置缺陷在 EL、PL 成像结果中的区别^[54]。

4.2 钙钛矿光伏电池微区缺陷成像应用分析

与有机半导体不同,钙钛矿半导体材料具有

很强的光致发光特性。因此,光致发光(PL)常用于分析钙钛矿薄膜的结晶成膜质量以及器件内部的缺陷分布^[55]。与此同时,当聚焦于研究钙钛矿电池器件内部复杂的离子迁移过程时,研究人员也常借助 LBIC 测试来研究器件老化过程中光电流所发生的变化,进而理解分析器件的失效过程。

在缺陷所导致的钙钛矿电池性能衰减过程中,其发光特性和光生电流能力会受到一定的影响。Perrin 团队探究了高温、水氧对结构为 ITO/SnO₂/Perovskite/PTAA/Au 的 n-i-p 型 PSCs 器件性能的稳定性影响^[56]。作者比较了钙钛矿电池在三种不同老化测试条件:C1(85 °C/0% O₂/0% RH)、C2(85 °C/21% O₂/1% RH)和 C3(85 °C/21% O₂/40% RH)放置 500 h 后的器件性能,并分别利用 LBIC 和 PL 对老化前后的器件进行成像分析。LBIC 测试结果如图 5(a)所示,可以看出,器件在老化后出现了明显的光生电流分布不均匀,表明器件内部发生了显著降解。对比器件的 PL 成像(图 5(b))可以看出,初始器件的有效区域发光较弱,而老化后的器件中出现 PL 增强。这表明,器件老化过程中主要是由于界面的失效而非钙钛矿薄膜的失效。几种不同老化条件对比结果表明,85 °C 高温、且有水氧条件下器件失效最为显著,这与器件 J-V 测试结果相符。从结果来看,LBIC 和 PL 成像方法结合,可以明确判断老化过程界面的变化,这为器件失效原因分析提供了一个很好的方法参考。

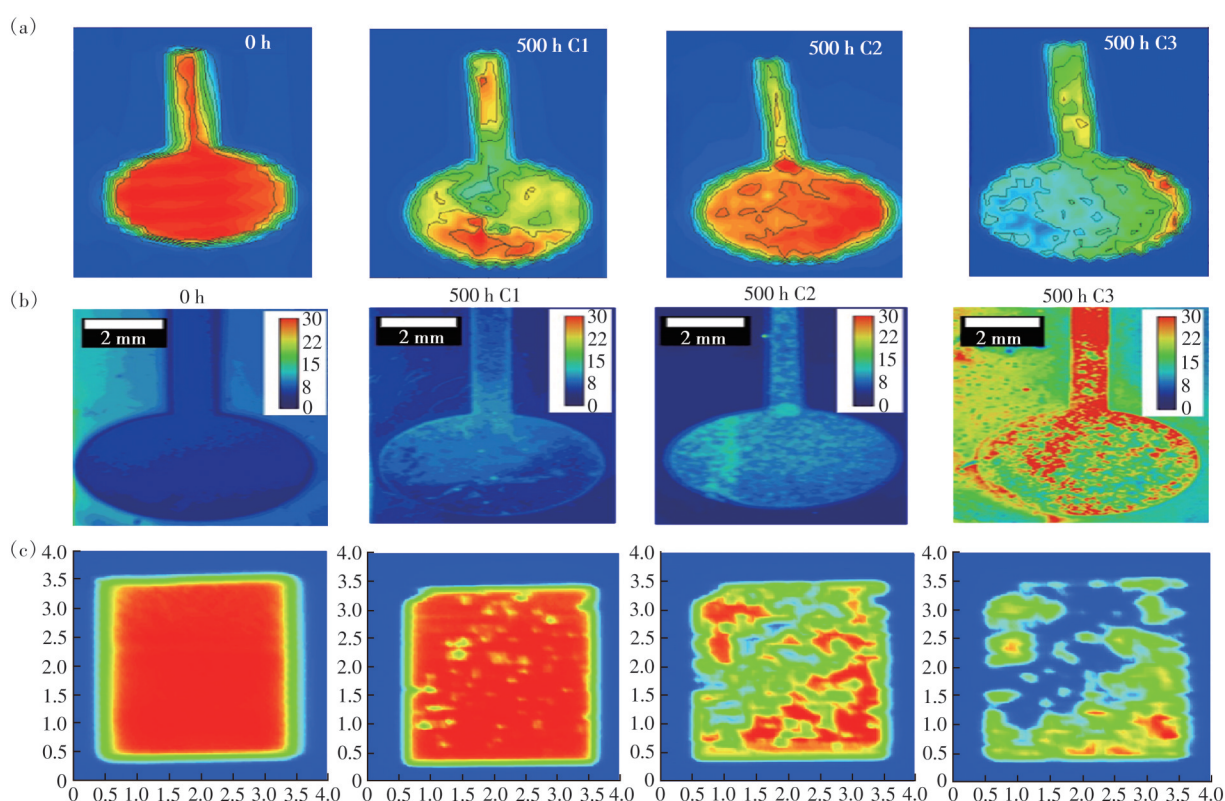


图 5 (a)结构为 ITO/SnO₂/Perovskite/PTAA/Au 的钙钛矿电池 (PSCs) 在初始状态 (0 h) 以及在 C1、C2 和 C3 条件下老化 500 h 后的 LBIC 测试结果; (b) 不同条件 PL 成像测试结果^[56]; (c) 结构为 ITO/PEDOT:PSS/MAPbI₃/PC₆₁BM/Al 器件老化 0 h、15 h、36 h、72 h 的 LBIC 图像^[57]

Fig.5 (a) LBIC test results of perovskite solar cells with a structure of ITO/SnO₂/Perovskite/PTAA/Au (PSCs) in the initial state (0 h) and after 500 h of aging under conditions C1, C2 and C3. (b) PL imaging test results under different conditions. (c) LBIC (Light-beam induced current) images of the ITO/PEDOT:PSS/MAPbI₃/PC₆₁BM/Al cell

作者团队研究了结构 ITO/PEDOT:PSS/MAPbI₃/PC₆₁BM/Al 的钙钛矿电池在光照下的性能衰减行为, 并利用 LBIC 研究了衰减过程中器件光电流分布的均匀性^[57]。图 5(c) 为光照老化不同时间的器件的 LBIC 测试结果。可以明显看出, 随着老化时间的延长, 器件有效区域光生电流逐渐不均匀。老化 72 h 时后, 器件出现无电流区域。LBIC 低电流位区域与光学成像中电极缺陷分布对应, 因此, 作者认为电极缺陷是造成器件性能衰减的主要原因。需要指出的是, 对比老化过程可以发现缺陷在器件区域内随机分布, 因此推断这一老化过程不是由于水汽的边缘扩散而导致。结合 ToF-SIMS 结果, 推断出 CH₃NH₃⁺ 和 I⁻ 向电极迁移是导致电极产生缺陷造成器件性能衰减的具体机制。

通过成像方法研究器件的衰减情况十分普遍, Perrin 团队使用 LBIC、PL 成像方法探究钙钛矿电池的老化过程和添加 AVAI 对于器件老化的提升作用^[58]; 陈江照团队使用 LBIC 成像方法, 对比说明钝化钙钛矿缺陷的方法有效, 从而大

幅提升了电池的稳定性^[59-61]。Zhu 等使用 PL 成像方法研究了器件受环境因素 (如湿度、温度、光和电偏置) 影响而导致的衰退^[62]。此外, 在大面积钙钛矿电池模组中, 成像方法也得到了广泛应用^[63]。

除了以上论述, 成像方法在钙钛矿器件的衰减研究中的使用还有很多。Soufiani 团队利用 EL 和 PL 研究了结构为 FTO/c-TiO₂/MAPbI₃/Spiro-OMeTAD/Au 的钙钛矿电池器件在光照 *I-V* 扫描测试过程中的变化^[64]。图 6(a) 为使用圆形掩膜进行光照后的 EL 成像图, 从中可以看出受光区域的 EL 强度显著高于未受光区域。这是由于光照后导致局域接触电阻降低, 同时光照提升了器件的电荷收集效率。放置一天后, 光照区域的 EL 成像变暗而 PL 成像增强。PL 成像增强表明钙钛矿薄膜自身并未发生降解, EL 变弱的原因主要来自于界面的失效。结合透射电子显微镜测试分析表明, 钙钛矿层与 TiO₂ 层之间发生了分层, 这是导致器件失效的重要原因。从结果来看, 将 EL 和 PL 成像方法

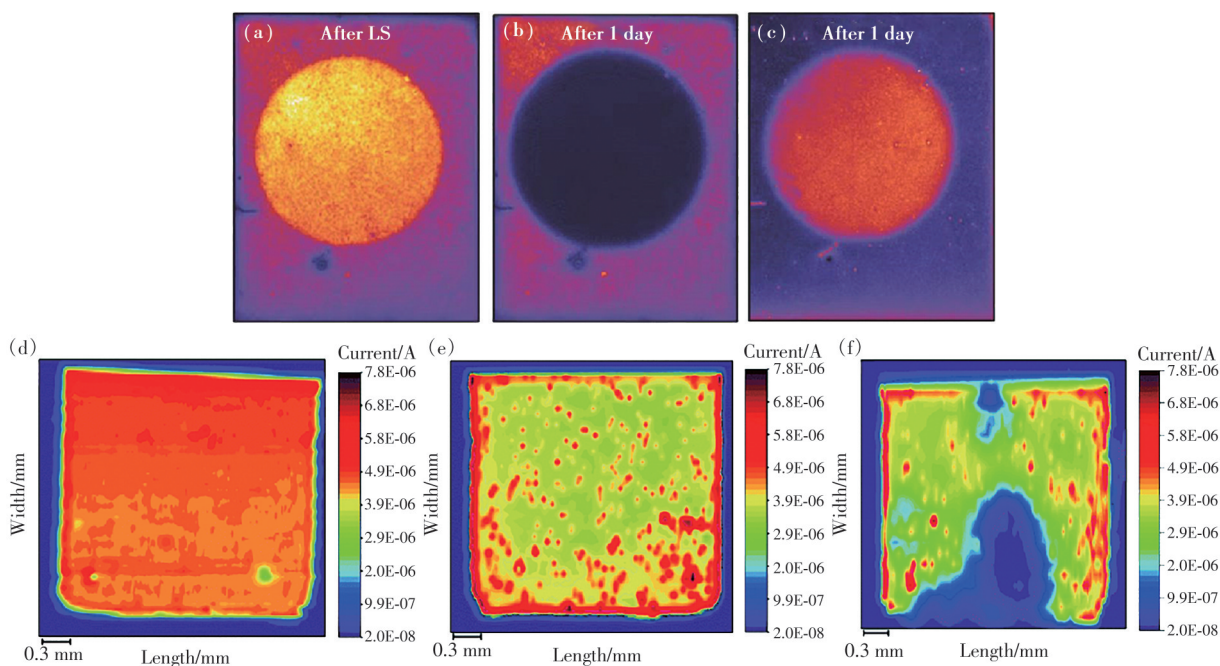


图6 光照 I - V 测试 30 min 对器件的影响:(a)光照后 EL 成像,放置 1 天后 EL(b)及 PL(c)成像^[64]; (d)~(f)惰性气氛钙钛矿电池的 LBIC 成像,分别为 0, 7, 28 天^[65]

Fig.6 Influence of 30 min light I - V measurement on cells; (a) EL imaging of the cells immediately after I - V measurement, EL (b) and PL(c) images of the cell after one-day dark storage. LBIC image of the pristine(d) and after 7 d (e) and 28 d(f) of storage in N_2 glove-box

结合,可以明确判断老化过程界面的变化,并且测试过程十分简便。

在长时间光照条件下,钙钛矿器件会发生衰减,光生电流能力明显下降。西南大学宋群梁团队利用 LBIC 探究了结构为 n-i-p 的钙钛矿电池在手套箱中放置衰减过程中的器件电流成像变化^[65]。图 6(d)、(e)、(f)分别为初始器件、放置 7 天和 28 天的 LBIC 成像。从图中可以看出,器件初始时表现出均匀的光电流分布;然而,在放置 7 天后,器件区域电流出现明显下降,且器件边缘出现零星点状缺陷;放置 28 天后,器件电流继续下降,并有无电流区域出现,表明器件出现无效死区。钙钛矿薄膜老化前后的 SEM 图像表明,老化前后钙钛矿薄膜并无明显变化,这说明界面降解应该是器件衰减的最主要因素。

发光成像技术在钙钛矿电池中也常被用来表征器件缺陷状况。Fischer 团队通过 PL、ILIT 成像方法探究钙钛矿硅叠层电池的界面接触^[66]。此外,Ishikawa 也将 EL、PL、ILIT 成像方法相结合,找到一种检测钙钛矿电池缺陷区域的有效策略^[67]。

Spiro-OMeTAD 掺杂 Li-TFSI 和 t-BP 是 n-i-p 型电池常用的空穴传输材料。制备器件过程中通常需要经过空气氧化来提升性能,氧化过程中器件

光生电流能力显著增加。马昌期团队^[68]利用光致发光(PL)成像研究了氧化过程对器件性能的影响。图 7(a)给出了初始未氧化、半器件前氧化以及完整器件后氧化的电池进行的 PL 成像。如图所示,未氧化器件区域 PL 强度高,且与有效区外钙钛矿发光强度相一致。前氧化和后氧化过程降低了器件区域的 PL 强度,这与钙钛矿层的发光强度以及荧光寿命的降低一致。这意味着氧化过程提升了光生载流子向 Spiro-OMeTAD 层的注入效率,Spiro-OMeTAD 对钙钛矿激子形成了更加有效的猝灭。有趣的是,钙钛矿电池氧化增加电流是在器件区域内均匀提升(图 7(b)),说明 Spiro-OMeTAD 层氧化过程不是由边缘扩散引起的。结合 ToF-SIMS 测试,作者提出了一个电化学氧化的新机制^[68]。

除了利用成像结果可视化的特性,探究器件衰减过程及器件材料氧化过程(器件性能变化)也有对原有方法做出的改进。Schubert 基于 PL 成像技术方法,通过对电池光致发光结果进一步处理,实现对单片钙钛矿硅叠层太阳能电池中每个子电池的隐含开路电压(iV_{oc})成像方法^[69]。研究中对两种钙钛矿材料 L1(成分为 $CS_{0.05}FA_{0.85}MA_{0.1}PbI_{2.9}Br_{0.1}$)和 L2(成分为 $CS_{0.05}(FA_{0.90}MA_{0.10})_{0.95}Pb-$

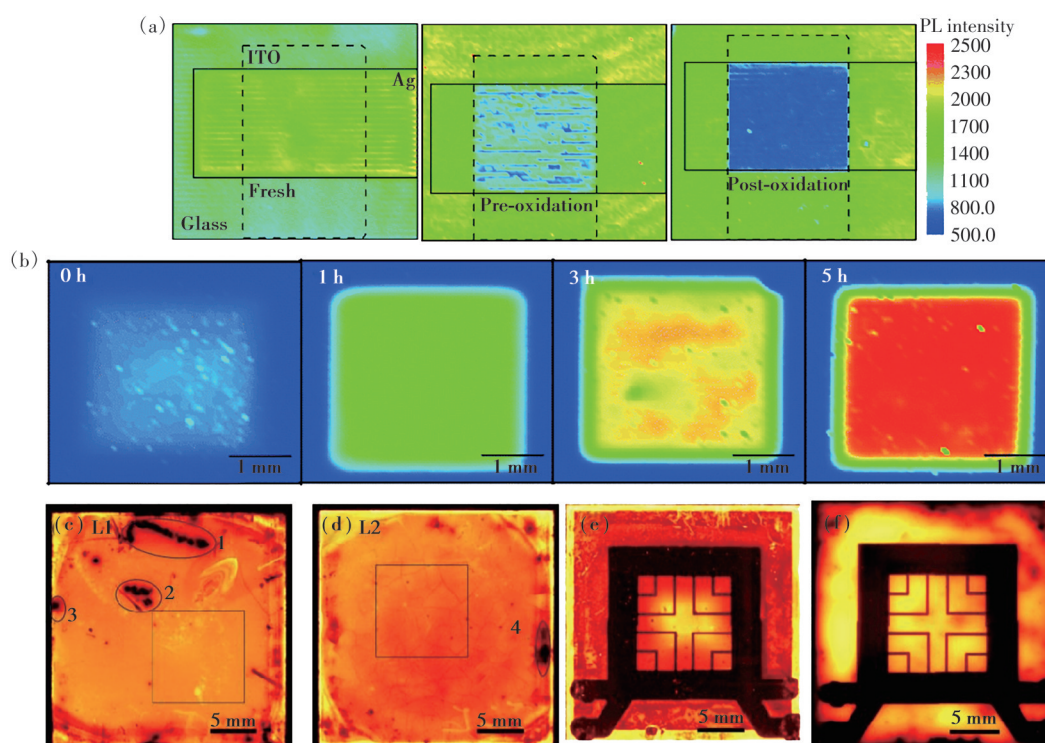


图 7 (a)n-i-p 型钙钛矿电池未氧化、前氧化、后氧化的 PL 成像;(b)器件后氧化过程中的 LBIC 成像^[68];(c)~(d)两个钙钛矿层 L1/L2 的 iV_{oc} 成像结果;(e)~(f)叠层电池钙钛矿顶部电池和硅底部电池的 iV_{oc} 成像结果^[69]

Fig.7 (a)PL imaging. (b)LBIC imaging of the device during oxidation^[68]. (c)~(d)The iV_{oc} imaging results of the two perovskite layers L1/L2. (e)~(f)The iV_{oc} imaging results of the perovskite top cell and silicon bottom cell of the tandem battery^[69]

($I_{0.95}Br_{0.05}$)₃)进行了 iV_{oc} 成像,图 7(c)、(d)展示了对应的成像结果。L1 方框内区域 iV_{oc} 图像与 PL 光谱计算的 iV_{oc} 分别为 1.094 V 和 1.097 V, L2 方框内区域 iV_{oc} 图像与 PL 光谱计算的 iV_{oc} 分别为 1.093 V 和 1.090 V,结果基本一致,充分说明了 iV_{oc} 成像结果的可信性。

随后,该团队进一步使用这种成像方法对钙钛矿硅叠层串联电池进行 iV_{oc} 成像分析研究。顶部是结构为 ITO/2PACz/Perovskite/ C_{60} /SnO_x/ITO/Ag/MgF₂ 的钙钛矿,底部为硅电池。图 7(c)、(d)为钙钛矿顶部电池和硅底部电池的 iV_{oc} 成像结果。结果显示,钙钛矿顶部电池和硅底部电池的有效区域 iV_{oc} 平均值分别为 1.140 V 和 0.676 V,而器件标准光源下整体 V_{oc} 仅为 1.773 V。可以看出,实际器件的 V_{oc} 与理论 iV_{oc} 相差 0.043 V,这里认为实际叠层电池接触位置并不是理想状态下的能带匹配,器件制作还需进一步改进。

以上数据表明, Schubert 团队基于 PL 成像技术提出的 iV_{oc} 成像方法可以快速得出器件的 iV_{oc} 结果,并可以分辨制作过程中产生的缺陷。并且, iV_{oc} 成像方法操作简单,适用范围广泛,单结钙钛矿电池和叠层电池都可使用。这项研究为光伏器

件测试提供了一个高效、快速的方法,具有十分重要的意义。

4.3 缺陷成像应用总结

综合上述文献报道的光电成像分析方法,在新型薄膜光伏电池器件缺陷分析方面的应用结果来看,目前缺陷成像研究主要包括三类:(1)通过人工引入缺陷,对比不同类型缺陷成像特征;(2)利用缺陷成像表征大面积器件的均匀性;(3)结合器件光电性能及薄膜材料的物理化学变化,探究器件性能衰减的本质机制。

此外,从上述讨论结果来看, PL 成像分析方法对发光层缺陷具有较强的检出能力,而 EL/LBIC 则是对器件层面上的电转光/光转电流的缺陷的直接检测。因此,不同的缺陷检测方法对不同功能层具有不同的检测能力,在薄膜光伏电池工作均匀性以及缺陷失效的位置和类型的分析中可以起到十分重要的作用。

5 总结与展望

近些年来,太阳能电池效率不断突破创造新高,对新型纳米薄膜光伏电池的大面积均匀性以及老化过程中的缺陷表征变得十分重要。目前,对

薄膜光伏电池缺陷成像主要有 PL、EL、LBIC、LIT 等。由于不同的成像方法所基于的原理不同,各种方法对缺陷的解析有其独特性。为了全面了解器件内部的各种缺陷,成像分析方法常常与器件的其他表征方法结合进行。例如,结合 J - V 测试结果研究器件衰减过程中器件光生电流均匀性变化,利用 ToF-SIMS 探究缺陷位点中元素的变化过程。

从纳米薄膜太阳能电池技术发展需求来看,薄膜光伏电池缺陷成像分析方法与应用主要呈以下几点趋势:(1)更高的缺陷分辨率:第三代薄膜光伏电池的功能层厚度通常小于 $1\ \mu\text{m}$,可以预见,器件的初始缺陷应该小于厚度。为了更早更好地检测出薄膜太阳能电池中的缺陷,对于新型薄膜光伏电池缺陷的检测分辨率提出了更高的要求,未来将向着小于 $1\ \mu\text{m}$ 甚至纳米尺度发展。(2)推动缺陷成像技术在器件质量控制和生产反馈机制中的应用,如在制备线上部署快速 LBIC 或 EL 在线检测系统,提升太阳能电池器件良率与可靠性,真正将缺陷成像技术应用于实际生产中。另外,目前的

光电信号采集系统多为外国产品,还需进一步国产化,降低成本。(3)多种缺陷分析方法集成应用:纳米薄膜光伏电池缺陷类型多,位置多变,通常无法通过单一分析方法准确获得缺陷的位置与结构特征。将多种缺陷成像方法集成,将可以提高缺陷检测分析的精准性,有利于器件缺陷类型的判断与分析,因而将成为缺陷分析的一个重要发展趋势。(4)大数据集成自动图像识别:近年来,人工智能(AI)技术快速发展,基于 AI 的图像识别技术也实现了突飞猛进。结合 AI 图像识别进行薄膜太阳能电池缺陷的分析检测可以自动化高效地对不同缺陷类型进行分析判别,能够短时间内识别出光伏器件中的缺陷,大幅提升缺陷的检出能力。这也必将是薄膜太阳能电池缺陷检测分析发展的必然趋势。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250058>

参 考 文 献:

- [1] WANG B C, LIU Y F, WANG D J, *et al.* A review of the photothermal-photovoltaic energy supply system for building in solar energy enrichment zones [J]. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2024, 191: 114100.
- [2] BECQUEREL E. Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires [J]. *Comptes Rendus*, 1839, 9: 561-567.
- [3] CHAPIN D M, FULLER C S, PEARSON G L. A new silicon p - n junction photocell for converting solar radiation into electrical power [J]. *J. Appl. Phys.*, 1954, 25(5): 676-677.
- [4] YOSHIKAWA K, KAWASAKI H, YOSHIDA W, *et al.* Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% [J]. *Nat. Energy*, 2017, 2(5): 17032.
- [5] MAKITA K, KAMIKAWA Y, MIZUNO H, *et al.* GaAs//CuInGaSe-based multijunction solar cells with 30% efficiency under low concentrated sunlight [J]. *Solar RRL*, 2024, 8(19): 2400351.
- [6] MAKITA K, KAMIKAWA Y, MIZUNO H, *et al.* GaAs//CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ three-junction solar cells with 28.06% efficiency fabricated using a bonding technique involving Pd nanoparticles and an adhesive [J]. *IEEE J. Photovoltaics*, 2022, 12(2): 639-645.
- [7] JEONG J, KIM M, SEO J, *et al.* Pseudo-halide anion engineering for α -FAPbI₃ perovskite solar cells [J]. *Nature*, 2021, 592(7854): 381-385.
- [8] KIPPELEN B, BRÉDAS J L. Organic photovoltaics [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2009, 2(3): 251-261.
- [9] MAZZIO K A, LUSCOMBE C K. The future of organic photovoltaics [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, 44(1): 78-90.
- [10] ZHU L, ZHANG M, ZHOU G Q, *et al.* Achieving 20.8% organic solar cells via additive-assisted layer-by-layer fabrication with bulk p - i - n structure and improved optical management [J]. *Joule*, 2024, 8(11): 3153-3168.
- [11] ZHOU J J, TAN L G, LIU Y, *et al.* Highly efficient and stable perovskite solar cells via a multifunctional hole transporting material [J]. *Joule*, 2024, 8(6): 1691-1706.
- [12] DABOCZI M, KIM J, LEE J, *et al.* Towards efficient integrated perovskite/organic bulk heterojunction solar cells: interfacial energetic requirement to reduce charge carrier recombination losses [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(25): 2001482.

- [13] ZHOU H P, CHEN Q, LI G, *et al.* Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells [J]. *Science*, 2014, 345(6196): 542-546.
- [14] CHIANG C H, TSENG Z L, WU C G. Planar heterojunction perovskite/PC₇₁BM solar cells with enhanced open-circuit voltage via a (2/1)-step spin-coating process [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2014, 2(38): 15897-15903.
- [15] TONG Y, XIAO Z, DU X Y, *et al.* Progress of the key materials for organic solar cells [J]. *Sci. China Chem.*, 2020, 63(6): 758-765.
- [16] RUGGERI E, ANAYA M, GAŁKOWSKI K, *et al.* Halide remixing under device operation imparts stability on mixed-cation mixed-halide perovskite solar cells [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(36): 2202163.
- [17] SHARIF R, KHALID A, AHMAD S W, *et al.* A comprehensive review of the current progresses and material advances in perovskite solar cells [J]. *Nanoscale Adv.*, 2023, 5(15): 3803-3833.
- [18] ZHAO F W, ZHOU J X, HE D, *et al.* Low-cost materials for organic solar cells [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(43): 15395-15406.
- [19] LUNGENSCHMIED C, DENNLER G, NEUGEBAUER H, *et al.* Flexible, long-lived, large-area, organic solar cells [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2007, 91(5): 379-384.
- [20] YIN Z G, WEI J J, ZHENG Q D. Interfacial materials for organic solar cells: recent advances and perspectives [J]. *Adv. Sci.*, 2016, 3(8): 1500362.
- [21] ZHOU D, ZHOU T T, TIAN Y, *et al.* Perovskite-based solar cells: materials, methods, and future perspectives [J]. *J. Nanomater.*, 2018, 2018(1): 8148072.
- [22] BRENNER T J K, MCNEILL C R. Spatially resolved spectroscopic mapping of photocurrent and photoluminescence in polymer blend photovoltaic devices [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2011, 115(39): 19364-19370.
- [23] DENG X F, WEN X M, ZHENG J H, *et al.* Dynamic study of the light soaking effect on perovskite solar cells by *in-situ* photoluminescence microscopy [J]. *Nano Energy*, 2018, 46: 356-364.
- [24] RIBES A C. *Applications and Characterization of A Confocal Scanning Laser MACROscope/Microscope* [D]. Waterloo: University of Waterloo, 1997.
- [25] TEAL A, DORE J, VARLAMOV S. Photoluminescence imaging of thin film silicon on glass [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2014, 130: 1-5.
- [26] RAHMAN M R U, CHEN H Y. Defects inspection in polycrystalline solar cells electroluminescence images using deep learning [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 40547-40558.
- [27] FUYUKI T, KONDO H, KAJI Y, *et al.* Analytic findings in the electroluminescence characterization of crystalline silicon solar cells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, 101(2): 023711.
- [28] TVINGSTEDT K, VANDEWAL K, GADISA A, *et al.* Electroluminescence from charge transfer states in polymer solar cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, 131(33): 11819-11824.
- [29] FUYUKI T, KONDO H, YAMAZAKI T, *et al.* Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(26): 262108.
- [30] MORALEJO B, GONZÁLEZ M A, JIMÉNEZ J, *et al.* LBIC and reflectance mapping of multicrystalline Si solar cells [J]. *J. Electron. Mater.*, 2010, 39(6): 663-670.
- [31] CARSTENSEN J, POPKIROV G, BAHR J, *et al.* CELLO: an advanced LBIC measurement technique for solar cell local characterization [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2003, 76(4): 599-611.
- [32] FRÜHAUF F, BREITENSTEIN O. DLIT- versus ILIT-based efficiency imaging of solar cells [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2017, 169: 195-202.
- [33] BREITENSTEIN O, LANGENKAMP M. *Lock-in Thermography* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003: 112-231.
- [34] BESOLD S, HOYER U, BACHMANN J, *et al.* Quantitative imaging of shunts in organic photovoltaic modules using lock-in thermography [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2014, 124: 133-137.
- [35] LIAO Y J, HSIEH Y C, CHEN J T, *et al.* Large-area nonfullerene organic photovoltaic modules with a high certified power conversion efficiency [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(6): 7911-7918.
- [36] CHENG Y Y, JI Y T, ZHANG D Y, *et al.* Nitrogen-blowing assisted strategy for fabricating large-area organic solar modules with an efficiency of 15.6% [J]. *Polymers*, 2024, 16(11): 1590.
- [37] SONG P, LIU J Y, OLIULLAH M, *et al.* Series resistance imaging of silicon solar cells by lock-in photoluminescence

- [J]. *Phys. Status Solidi (RRL) - Rapid Res. Lett.*, 2017, 11(7): 1700153.
- [38] LIN K M, LIN H H, DANDAGE H K, *et al.* Pseudo colorization of electroluminescence images of multi-crystalline silicon solar cells for defect inspection [J]. *Mod. Phys. Lett. B*, 2019, 33(14-15): 1940010.
- [39] DONG S H, ZHANG J X, SHEN Y, *et al.* Referring solar cell defect segmentation in electroluminescence images [J]. *IEEE Trans. Ind. Inf.*, 2025, 21(9): 6788-6798.
- [40] WOOD S, O'CONNOR D, JONES C W, *et al.* Transient photocurrent and photovoltage mapping for characterisation of defects in organic photovoltaics [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2017, 161: 89-95.
- [41] 王亚玲, 闫翎鹏, 董海亮, 等. 封装对聚合物太阳能电池性能和稳定性的影响 [J]. *中国材料进展*, 2023, 42(5): 398-405.
- WANG Y L, YAN L P, DONG H L, *et al.* Encapsulation effect on performance and stability of organic solar cells [J]. *Mater. China*, 2023, 42(5): 398-405. (in Chinese)
- [42] LU X, XIE C, LIU Y, *et al.* Increase in the efficiency and stability of large-area flexible organic photovoltaic modules *via* improved electrical contact [J]. *Nat. Energy*, 2024, 9(7): 793-802.
- [43] CHEN H Y, ZHANG R, CHEN X B, *et al.* A guest-assisted molecular-organization approach for >17% efficiency organic solar cells using environmentally friendly solvents [J]. *Nat. Energy*, 2021, 6(11): 1045-1053.
- [44] KREBS F C, SØNDERGAARD R, JØRGENSEN M. Printed metal back electrodes for R2R fabricated polymer solar cells studied using the LBIC technique [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2011, 95(5): 1348-1353.
- [45] ZHANG B, CHEN W J, CHEN H Y, *et al.* Rapid solidification for green-solvent-processed large-area organic solar modules with >16% efficiency [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2024, 17(8): 2935-2944.
- [46] WÜRFEL U, HERTERICH J, LIST M, *et al.* A 1 cm² organic solar cell with 15.2% certified efficiency: detailed characterization and identification of optimization potential [J]. *Sol. RRL*, 2021, 5(4): 2000802.
- [47] LIU C H, LIAN Y C, SONG J L, *et al.* Oligomeric carbazole phosphonic acid as hole-transporting layer for organic solar cells with efficiency of 19.63% [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(13): 2417786.
- [48] CHEN H Y, SUN W W, ZHANG R, *et al.* Heterogeneous nucleating agent for high-boiling-point nonhalogenated solvent-processed organic solar cells and modules [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(27): 2402350.
- [49] CHEN H Y, HUANG Y T, ZHANG R, *et al.* Organic solar cells with 20.82% efficiency and high tolerance of active layer thickness through crystallization sequence manipulation [J]. *Nat. Mater.*, 2025, 24(3): 444-453.
- [50] LLOBEL M A, RIVIÈRE G, ARRIVÉ C, *et al.* Fast and nondestructive failure analysis of organic photovoltaic modules for low-light harvesting: coupling variable illumination measurements to electroluminescence imaging [J]. *Sol. RRL*, 2021, 5(1): 2000634.
- [51] DISTLER A, BRABEC C J, EGELHAAF H J. Organic photovoltaic modules with new world record efficiencies [J]. *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, 2021, 29(1): 24-31.
- [52] KARL A, OSVET A, VETTER A, *et al.* Discriminating bulk *versus* interface shunts in organic solar cells by advanced imaging techniques [J]. *Prog. Photovoltaics*, 2019, 27(5): 460-468.
- [53] KARL A, OSVET A, LI N, *et al.* A general guideline for vertically resolved imaging of manufacturing defects in organic tandem solar cells [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2020, 7(13): 2000336.
- [54] LLOBEL M A, RIVIÈRE G, ARRIVÉ C, *et al.* Impact of interface layers on luminescence imaging of organic solar cells: discriminating ETL from HTL defects [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(23): 26293-26300.
- [55] CAO Y, YAN N, WANG M Z, *et al.* Designed additive to regulated crystallization for high performance perovskite solar cell [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63(30): e202404401.
- [56] PLANES E, PERRIN L, MATHERON M, *et al.* Degradation mechanisms in a mixed cations and anions perovskite solar cell: mitigation effect of the gold electrode [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 4(2): 1365-1376.
- [57] GUO S X, SUN X, DING C Z, *et al.* Non-uniform chemical corrosion of metal electrode of p-i-n type of perovskite solar cells caused by the diffusion of CH₃NH₃I [J]. *Energy Technol.*, 2020, 8(12): 2000250.
- [58] PERRIN L, PLANES E, SHIOKI T, *et al.* How ammonium valeric acid iodide additive can lead to more efficient and stable carbon-based perovskite solar cells: role of microstructure and interfaces? [J]. *Sol. RRL*, 2024, 8(17): 2400393.
- [59] GENG T R, DING J K, ZHANG Z L, *et al.* Rationally tailored passivation molecules to minimize interfacial energy loss for efficient perovskite solar cells [J]. *Moore More*, 2025, 2(1): 9.

- [60] ZHANG Z L, FENG Y S, DING J K, *et al.* Rationally designed universal passivator for high-performance single-junction and tandem perovskite solar cells [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 753.
- [61] GAO W H, DING J K, MA Q X, *et al.* Synergistic modulation of orientation and steric hindrance induced by alkyl chain length in ammonium salt passivator toward high-performance inverted perovskite solar cells and modules [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(1): 2413304.
- [62] YU Z X, ZHANG C L, LI B, *et al.* Local performance analysis of perovskite solar cells: implications and perspectives [J]. *ACS Energy Lett.*, 2024, 9(12): 5810-5821.
- [63] HU Z Y, WANG Z J, GAO P. Advancements in scaling up perovskite solar cells: from small-area devices to large-scale modules [J]. *ChemPhysChem*, 2024, 25(22): e202400587.
- [64] SOUFIANI A M, HAMEIRI Z, MEYER S, *et al.* Lessons learnt from spatially resolved electro-and photoluminescence imaging: interfacial delamination in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ planar perovskite solar cells upon illumination [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2017, 7(9): 1602111.
- [65] YAO Y Q, WANG G, WU F, *et al.* The interface degradation of planar organic-inorganic perovskite solar cell traced by light beam induced current (LBIC) [J]. *RSC Adv.*, 2017, 7(68): 42973-42978.
- [66] FISCHER O, FELL A, MESSMER C, *et al.* Understanding contact nonuniformities at interfaces in perovskite silicon tandem solar cells using luminescence imaging, lock-in thermography, and 2D/3D simulations [J]. *Sol. RRL*, 2023, 7(19): 2300249.
- [67] KIMURA K, RAIFUKU I, KAWAMURA T, *et al.* Visualization of defects in perovskite solar cells using electroluminescence, photoluminescence, and thermal imaging methods [J]. *Appl. Phys. Express*, 2025, 18(3): 034003.
- [68] DING C Z, HUANG R, AHLÄENG C, *et al.* Synergetic effects of electrochemical oxidation of Spiro-OMeTAD and Li^+ ion migration for improving the performance of n-i-p type perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2021, 9(12): 7575-7585.
- [69] FISCHER O, BUI A D, SCHINDLER F, *et al.* Versatile implied open-circuit voltage imaging method and its application in monolithic tandem solar cells [J]. *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, 2025, 33(1): 40-53.



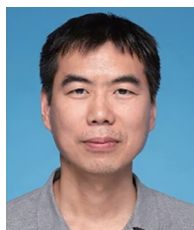
王伟(1999-),男,湖北随州人,硕士研究生,2022年于江苏科技大学获得学士学位,主要从事薄膜光伏电池微区成像系统的研究。

E-mail: wwang2023@sinano.ac.cn



马昌期(1977-),男,福建永安人,博士,研究员,博士生导师,2003年于中国科学院理化技术研究所获得博士学位,主要从事有机光电功能半导体材料与器件的研究。

E-mail: cqma2011@sinano.ac.cn



刘瑞(1979-),男,安徽界首人,博士,副教授,2009年于上海交通大学获得博士学位,主要从事微纳米器件的设计、加工、封装和测试的研究。

E-mail: liuruicxz@126.com