

基于扫描成像的光电器件高分辨缺陷检测技术研究

胡二涛¹, 刘嘉伟¹, 邵鹏¹, 辛颢², 蔡清元^{3*}, 段微波³, 陈良尧⁴

(1. 南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏南京 210023;

2. 南京邮电大学信息材料与纳米技术研究院柔性电子全国重点实验室, 江苏南京 210023;

3. 中国科学院上海技术物理研究所上海市光学薄膜与光谱调控重点实验室, 上海 200083;

4. 复旦大学光科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 光电流扫描成像技术是太阳能电池及光电探测器研究的重要技术支撑, 然而振镜驱动光束扫描方式存在扫描范围受限和图像畸变问题。为克服上述弊端, 面向大面积光电器件光电响应一致性的检测需求, 基于光学组件扫描方式, 本文研制了一套大成像范围、高空间分辨率、高稳定性、低成本的光电流扫描成像自动化测试系统, 高细分模式可实现亚微米几何定位(细分数6400, 扫描步长0.625 μm), 兼顾了大范围和高分辨率的样品扫描测试需求, 且整体结构简单, 极大降低了扫描成像系统的成本。使用表面覆盖有“南”字白纸和光栅条掩模板的硅光电池样品, 证明扫描范围大于10×10 mm², 空间分辨率可达0.6 μm。对Cu₂ZnSnS₄和Cu₂ZnSn(S, Se)₄太阳能电池的表面光电流图像进行了表征, 证明Cu₂ZnSnS₄电池存在较多缺陷, 而Cu₂ZnSn(S, Se)₄电池表面光电响应均匀, 缺陷较少, 这些结果有助于改进电池的制备工艺。

关键词: 光电子学与激光技术; 光电流扫描成像; 光束诱导电流; 光电器件

中图分类号: TN29

文献标识码: A

High-resolution defect detection in optoelectronic device via scanning imaging technique

HU Er-Tao¹, LIU Jia-Wei¹, SHAO Peng¹, XIN Hao², CAI Qing-Yuan^{3*},
DUAN Wei-Bo³, CHEN Liang-Yao⁴

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. State Key Laboratory of Flexible Electronics & Institute of Advanced Materials, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

3. Shanghai Key Laboratory of Optical Coatings and Spectral Modulation, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

4. Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Photocurrent scanning imaging (mapping) technology is a key technique in the research of solar cells and photodetectors. However, traditional galvanometer-driven beam scanning methods are limited by a restricted scanning range and image distortion. To address these shortcomings and meet the need for testing the photocurrent uniformity of large-area optoelectronic devices, an automated photocurrent mapping testing system has been developed based on optical component scanning. This system offers a large imaging range, high spatial resolution, high stability, and low cost. With its high-precision mode, it can achieve sub-micron geometric positioning (subdivision number 6400, scanning step size 0.625 μm), fulfilling both large-area scanning requirements and providing high-resolution testing. Moreover,

收稿日期: 2025-02-03, 录用日期: 2025-03-19

Received date: 2025-02-03, accepted date: 2025-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(62275256)、2022东方英才计划青年项目、南京邮电大学自然科学基金(NY224106)、上海市光学薄膜与光谱调控重点实验室资助

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62275256); the 2022 Eastern Talent Plan Youth Project; the Natural Science Foundation of Nanjing University of Posts and Telecommunications (NY224106); the Open Fund of Shanghai Key Laboratory of Optical Coatings and Spectral Modulation

作者简介(Biography): 胡二涛(1987—), 男, 河南宝丰人, 副教授, 博士, 主要从事光电薄膜器件、光热/光声转换方面的研究. E-mail: ia-methu@njupt.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: qyc@mail.sitp.ac.cn

its simple structure greatly reduces the overall cost of the mapping system. Using a silicon solar cell sample with a white paper surface covered by the character “南” (south) or an encoder strip mask, it was demonstrated that the scanning range exceeded $10 \times 10 \text{ mm}^2$, with a spatial resolution of $0.6 \text{ }\mu\text{m}$. The system was also used to characterize the surface photocurrent images of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ solar cells. The results show that the $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ cell contains more defects, while the $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ cell exhibits a more uniform surface photocurrent response with fewer defects. These findings contribute to the optimization of solar cell fabrication processes.

Key words: optoelectronics and laser technology, photocurrent mapping, light beam induced current, optoelectronic device

引言

近年来,在太阳能利用及高性能光电检测需求的推动下,太阳能电池、光电探测器,尤其是新型低维材料基光电探测器得到了快速发展,其中,光电性能测试表征是必须且关键的一环^[1-5]。光束诱导电流(Laser or Light Beam Induced Current, LBIC)成像技术,作为一种非破坏性技术,可直接测量得到光电器件关键的光电响应图像。此外,LBIC成像技术可以提供太阳能电池或者光电探测器的缺陷^[6,7]、空间均匀性^[2]、扩散长度^[3]、局部效率及p-n结^[4](结区、结深度、漏电流位置)等关键信息,这对于进一步优化器件结构、提高器件光电转换效率极为重要,因此越来越受到科研人员的关注。

LBIC最初是由Wallmark于1957年提出,用于解释半导体结的横向光电流现象^[8]。1987年,Bajaj等人首次用LBIC技术研究碲镉汞材料的缺陷^[9]。此后,LBIC技术逐渐被大家所认知,并快速发展,尤其在二维光电探测器件领域显示出了极大的应用前景^[10-12]。LBIC测试系统构成主要有激光光源、CCD相机、电流测试系统和电脑^[3]。常见的光电流扫描成像(mapping)方式,主要有两种:(1)位移台驱动样品进行二维移动^[13]; (2)扫描振镜驱动光斑在样品上进行二维扫描^[7, 14-16]。对于样品移动成像方式,需要在样品的电极上焊接引线,不利于快速检测,且焊点电阻的不同也将给不同器件的性能对比带来影响。对于振镜扫描成像方式,样品固定不动,可直接使用探针连接器件的正负电极,便于快速检测,但存在图像扫描范围受限、XY扫描不一致导致的图像畸变、光路系统复杂等缺点^[17-20]。

针对上述问题,本文提出了基于移动光学组件的光束扫描成像方法,利用两个移动的反射镜实现光束在样品上的线性移动,进而响应成像。在扫描过程中,样品固定不动,兼容焊接电极引线和探针电极,克服了振镜扫描方式存在的扫描范围受限和图像畸变的缺点。高细分模式可实现亚微米几何

定位,兼顾了大扫描范围和高分辨率的样品扫描测试需求。此外,整体结构简单,极大降低了光电流mapping系统的成本。性能验证上,对表面覆盖有“南”字打印纸和光栅条掩模板的硅光电池样品进行了测试,分别验证了大扫描范围和高空间分辨率能力。在此基础上,对 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 和 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ 太阳能电池^[21-23]的表面光电流图像进行了表征。

1 系统硬件及扫描控制方案

1.1 系统硬件构成

图1(a)为研制的光电流mapping系统实物图,主要由光束扫描组件(scanning assembly)、三维样品台、探针台、源表和电动控制终端组成,其中光束扫描组件由高精度二维平移台、反射镜、半透半反镜、物镜和相机组成(图1(b)),两个电动位移台驱动光束在 x 和 y 方向移动。光束扫描组件的内部光路如图1(c)所示,入射激光经反射镜和半透半反镜依次反射发生 90° 转折,进入物镜照射到样品上,返回光透过半透半反镜进入相机,用于观察照射位置和光斑大小。测试系统所用的聚焦物镜为50倍无限共轭物镜,用于将光束聚焦于样品上。样品放置于手动三维调节样品台上,通过调节样品相对于物镜的距离并结合相机实时拍摄光斑的大小,实现光斑聚焦。图2(a)为聚焦状态下显微尺的照片,间隔为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 。图2(b)为聚焦状态下的光斑照片,大小约为 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 。

1.2 扫描控制方法与验证

基于设备自带的软件开发工具包进行二次编程实现自动化,与位移台控制器(卓立汉光,SC300)和源表(Keithley 2450)通信。数据采集和自动化控制系统的逻辑如图3所示。运行程序后,首先完成电动位移台、源表的参数设置及光斑位置的初始化,将激光光斑移动至样品上的合适位置。接着,控制源表进行 $V-I$ 曲线或 $I-T$ 曲线测试,以确保电路连通。然后,设置扫描步长和范围,开始mapping测量,并实时显示电流强度图和存储数据。

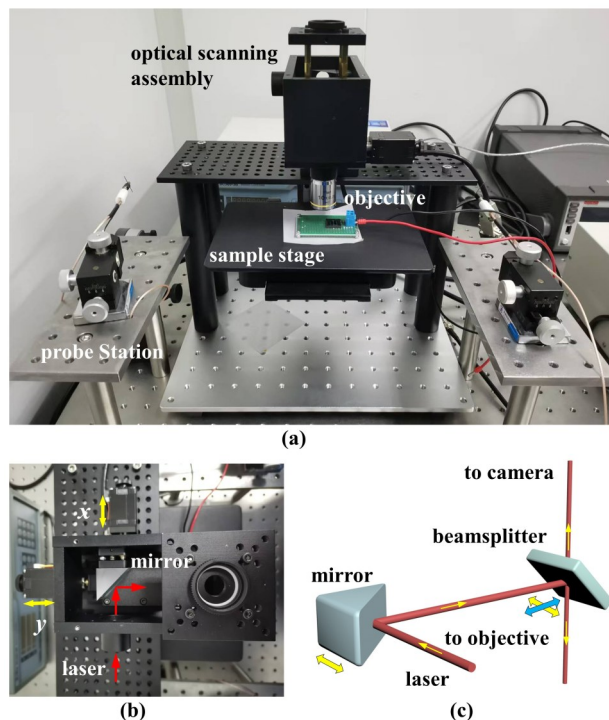


图1 研制的光电流 mapping 系统:(a)实物图;(b)由光学组件组成的光束扫描组件的内部结构;(c)光束扫描组件的内部光路示意图

Fig. 1 Configuration of the photocurrent mapping system: (a) photograph of the system; (b) structure of the optical scanning assembly; (c) schematic diagram of the optical path in the optical scanning assembly

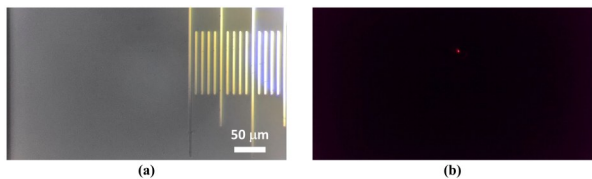


图2 相机拍摄的聚焦图像与光斑:(a)10 μm 间隔的测微尺;(b)聚焦光斑

Fig. 2 Images captured by the camera: (a) micrometer with a 10 μm interval; (b) focused light spot

为了验证系统的测量性能以及数据采集和自动化控制程序的可靠性,采用具有图形化特征的硅光电池作为参考样品进行测量,样品实物照片及测试结果如图4所示。电池的感光面积约为10×10 mm²,并带有“山”状电极。图4(b)为在650 nm 激光照射下,硅光电池的光电流图像,扫描范围为11×11 mm²。图像清晰地显示了“山”字形电极,且在电极附近的光电流更强,这主要是因为电极附近的电流更容易被收集到。此外,电流较大的区域与电池的实际感光面积相符,证实了系统的大范围扫

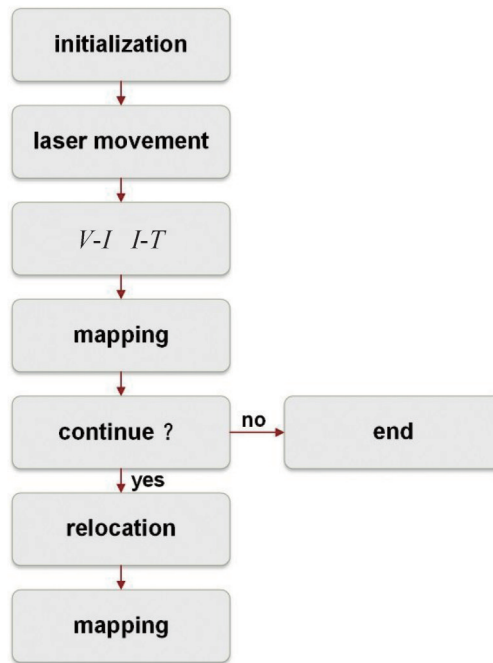


图3 光电流 mapping 系统的运行逻辑框图

Fig. 3 Operating logic of the photocurrent mapping system

描能力。对于更大的扫描范围,只需使用线性扫描范围更大的位移台即可。

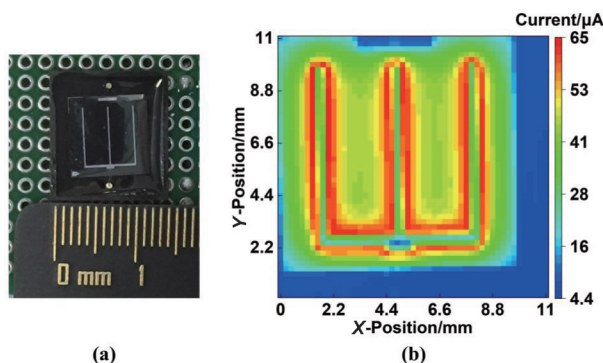


图4 硅光电池实物图和光电流图像:(a)硅光电池;(b)硅光电池的光电流图像

Fig. 4 Silicon photodiode and its photocurrent image: (a) picture of the silicon photodiode; (b) photocurrent image of the silicon photodiode

在硬件设置上,通过调整步进电机控制器的细分数(马达转一圈所需脉冲数,转一圈光斑移动0.5 mm)来控制位移台的物理分辨率。设置控制器的细分数为1 600,并对表面覆盖有“南”字(小五号字体,约3.2 mm高,图5(a))打印纸的硅光电池进行成像检测,扫描范围为3×3 mm²,步长为75 μm。使用CRAIC 20/30 紫外-可见-近红外光显微分光光度计测量了印有“南”字打印纸有墨区和无墨区的

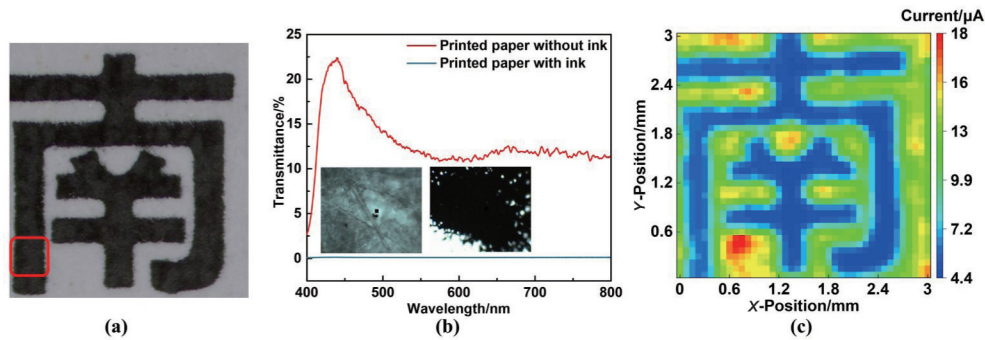


图5 打印的“南”字,有墨区与无墨区的透射光谱与光电流图像:(a)小五号字体打印的“南”字;(b)有墨区和无墨区的透射光谱,插图为对应的显微照片;(c)控制器1600细分扫描的光电流图像

Fig. 5 The printed character "南", its corresponding transmittance spectra of areas with ink or not and photocurrent image: (a) character "南" printed in small five-point font; (b) the transmittance spectra of inked and non-inked areas, with illustrations showing the corresponding microscopic images; (c) photocurrent image scanned with a controller resolution of 1600 subdivisions

透射光谱,入射光斑大小约为 $13\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$,结果如图5(b)所示。在 $650\ \text{nm}$ 处,有墨区和无墨区的透射率分别约为 12% 和 0.04% ,而且从其显微照片可以看出二者的透光不均匀。将“南”字覆盖在硅光电池的光电流响应相对均匀的区域,当激光光束聚焦后穿过有墨区和无墨区时,透射光强度不同,引起光电流大小差异,因此通过光电流 mapping 成像可将打印纸上的字迹检测出来。图5(c)为扫描的图像,显示出清晰的“南”字,且大小与字体实际大小基本一致。光电流结果表明,有墨区和无墨区的光电流比值约为 3 ,远小于二者透射率的比值 (300),这主要是因为打印纸表面存在较强的光散射。

考虑到减速螺杆与螺母的螺纹之间存在间隙,用于移动光束的位移台在左右移动过程中,螺纹间隙会对高定位精度产生影响。为此,分别采用S型扫描和单向扫描方式对“南”字左下角竖直部分进行扫描,步长为 $10\ \mu\text{m}$,如图6(a~b)所示。对于S型扫描,图像出现了锯齿状,这是位移台改变移动方向时,由螺纹间隙引起的定位误差。为了提高高分辨模式的定位精度,本系统主要采用的是单向扫描方式,即在扫描成像过程中, x 轴按照设定位移距离和步长,单向移动,逐步步进扫描,到设定终点距离后, x 轴返回起始位置, y 轴步进一步,然后 x 轴继续单向步进扫描,依次循环。

为了进一步验证系统的稳定性和分辨率,使用线数为 $360\ \text{LPI}$ (Lines Per Inch) 的光栅条(感光胶片菲林经紫外曝光制备)覆盖于硅光电池表面,并采集其光电流图像。图7(a)所示为光栅条的透射光

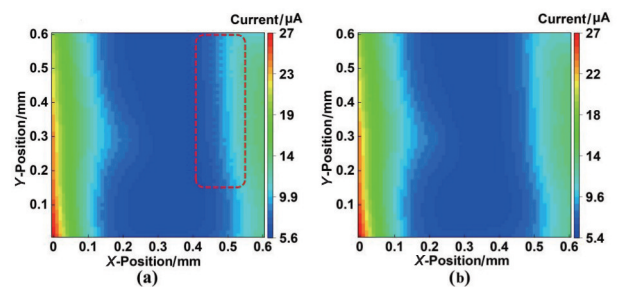


图6 打印的“南”字左下角竖直部分的光电流图像:(a)S型扫描;(b)单向扫描

Fig. 6 The photocurrent image of the vertical part at the lower-left corner of the printed character "南": (a) S-shaped scan; (b) unidirectional scan

谱曲线,其亮区和暗区的透射率分别为 73.9% 和 1.1% ,而且光透过相对均匀。光电流扫描步长分别设置为 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $1.25\ \mu\text{m}$ 和 $0.625\ \mu\text{m}$,扫描范围为 $0.1\times 0.1\ \text{mm}^2$,如图7(b~d)所示。图像呈现出清晰的光栅结构,线条的重复周期约为 $72.4\ \mu\text{m}$,与显微照片 ($73.8\ \mu\text{m}$) 及理论值 ($70.6\ \mu\text{m}$) 基本一致。光栅条亮区和暗区的光电流比值约为 $53\sim 62$,而透射率比值为 67 ,二者基本相符,证明了光电流测试结果的准确性。随着扫描步长的逐渐减小,图像的轮廓清晰度逐渐提升,证实所研制 mapping 系统的空间分辨率可达亚微米。驱动光束移动的位移台的丝杠导程为 $0.5\ \text{mm}$,在驱动器 800 细分下,每个脉冲的位移台移动距离为 $0.625\ \mu\text{m}$,可满足上述精细移动的步长要求。为进一步提高光束移动的空间分辨率,可设置更高的驱动器细分数(SC300的驱动器细分最高为 $51\ 200$,对应每个脉冲的移动距离为 $0.01\ \mu\text{m}$)。

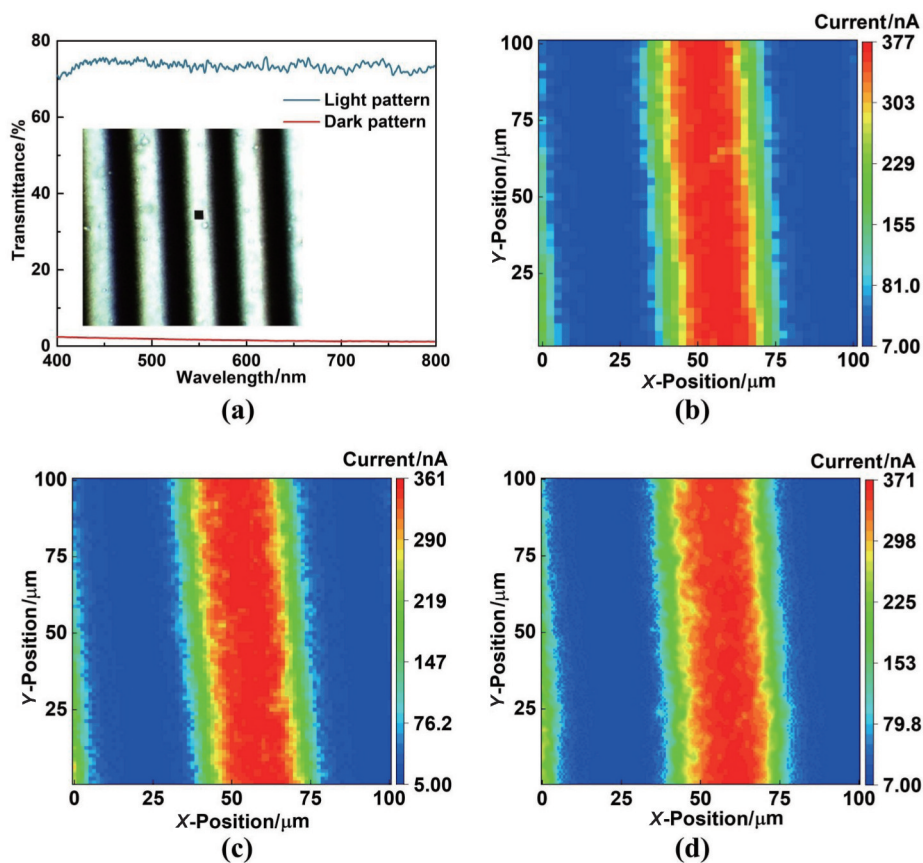


图7 光栅条亮区和暗区的透射光谱曲线及不同扫描步长下覆盖光栅条的硅太阳能电池的光电流扫描结果:(a)光栅条亮区和暗区的透射光谱曲线,插图为其显微照片;(b)2.5 μm 步长;(c)1.25 μm 步长;(d)0.625 μm 步长

Fig. 7 The transmission spectra curves of the bright and dark regions of the encoder strip and photocurrent images of the silicon photovoltaic cell covering the encoder strip at different scanning step sizes: (a) transmission spectral curves of the bright and dark regions of the encoder strip, with the illustration showing their microscopic images; (b) 2.5 μm ; (c) 1.25 μm ; (d) 0.625 μm

2 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 和 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ 太阳能电池光电流图像

在太阳能电池研究中,大面积LBIC成像技术可以在较大面积内定位出电池的缺陷,为改进电池制备工艺提供了有效检测工具。采用研制的光电流mapping系统对 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 和 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ 太阳能电池的表面光电流图像进行了测试^[23-26]。偏压设置为0 V,步长为0.025 mm,扫描范围设置为 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 。图8(a)为 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 太阳能电池,对应区域1和2的光电流图像如图8(b~c)所示。电池1的中间至左下角区域存在电流暗区,右上角出现了亮点,而电池2在下方出现了电流暗区和亮点,检测结果提示 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 太阳能电池吸光膜可能存在涂层不均匀现象。这些检测结果和提示信息有助于改进电池的制备工艺。对于 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ 太阳能电池(图8(d)),电池3和4的光电

流图像如图8(e~f)所示。相比而言, $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ 太阳能电池的光电流更加均匀。 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 和 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ 太阳能电池中的吸收层是采用溶液法制备前驱体溶液,并经旋涂成膜和高温硫化或硒化过程制备的。对于 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$,在制备过程中,可能存在杂质去除不干净、硫化不充分、晶粒间缺陷未充分消除等问题,导致电池存在较多缺陷^[24]。相对而言,硒化工艺制备的电池表面更加均匀,性能更好^[23]。这些测量结果为研究硫化或硒化工艺中处理温度、时间、蒸气压等因素的影响,改进电池的制备工艺和提高其光电转换效率提供了有效助力。

3 结论

针对高性能光电器件大面积光电响应一致性检测的需求,通过独特的光学扫描组件设计,实现了大成像范围、高空间分辨率、高稳定性的光电流

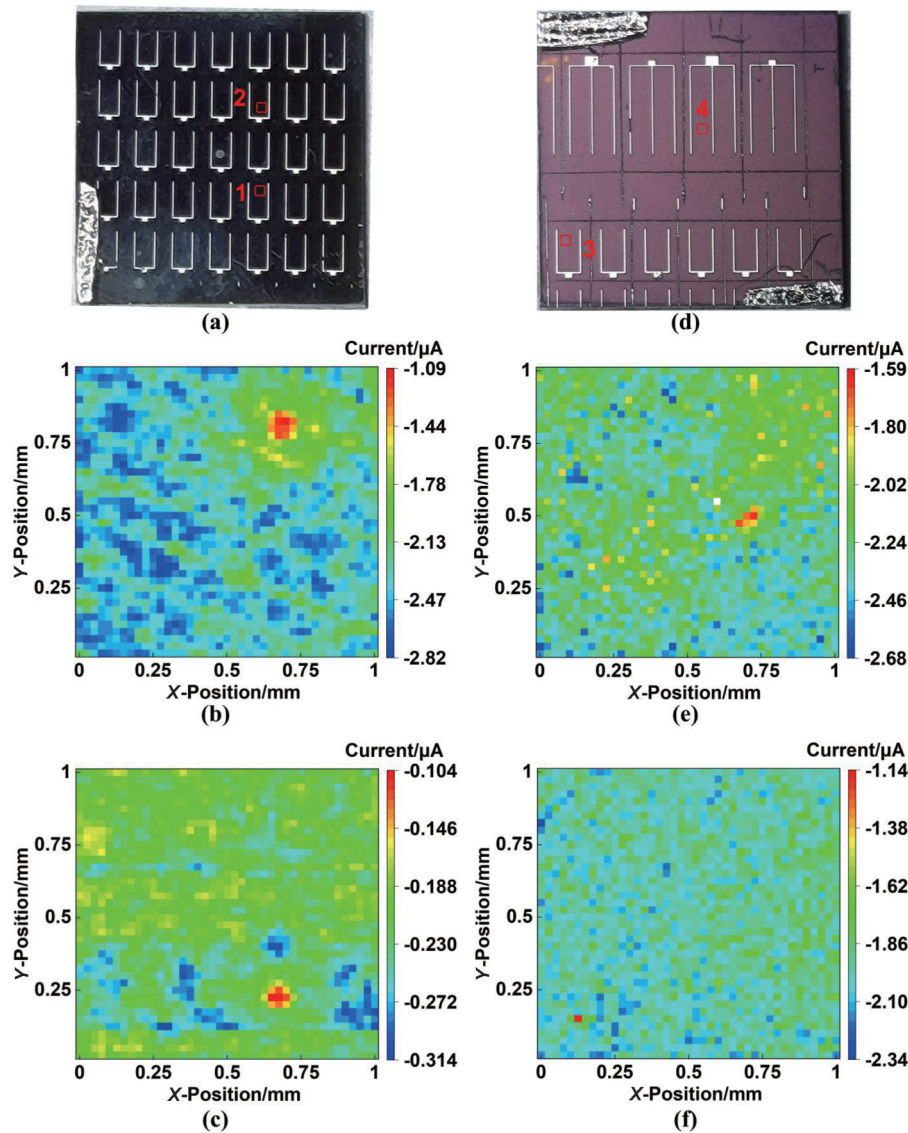


图8 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 和 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ 太阳能电池实物图及光电流扫描图像:(a) $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 太阳能电池样品实物照片;(b)电池1的光电流图像;(c)电池2的光电流图像;(d) $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ 太阳能电池样品实物照片;(e)电池3的光电流图像;(f)电池4的光电流图像

Fig. 8 Photographs and photocurrent images of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ solar cells: (a) photograph of the $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ solar cell; (b) photocurrent image of Solar Cell 1; (c) photocurrent image of Solar Cell 2; (d) photograph of the $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ solar cell; (e) photocurrent image of Solar Cell 3; (f) photocurrent image of Solar Cell 4

扫描成像测试系统,既避免了样品台移动成像方式需在电极上焊接引线的弊端,又克服了振镜扫描成像方式的扫描范围受限、图像畸变和光路系统复杂的问题。通过细致研究位移台驱动器细分数、光束扫描方式,实现了扫描成像范围大于 $10 \times 10 \text{ mm}^2$,空间分辨率达到亚微米。 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 和 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ 太阳能电池的表面光电流图像表明, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 电池表面存在较多缺陷,而 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ 电池表面光电流分布均匀。这些结果将对改进电池的制备工艺带来有益的帮助。

References

- [1] David A, Lukas H, Dan H, et al. Processing and characterization of large area InP nanowire photovoltaic devices [J]. *Nanotechnology*, 2023, 34(29): 295402.
- [2] Jamie S L, Sandheep R, Kevin J R, et al. Intensity modulated photocurrent microspectroscopy for next generation photovoltaics [J]. *Small Methods*, 2022, 6(09): 2200493.
- [3] Qiu W C, Hu W D. Laser beam induced current microscopy and photocurrent mapping for junction characterization of infrared photodetectors [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2014, 58(02): 1-13.
- [4] Britton W B, Hugh O C, Yang Y F, et al. Optoelectronic devices based on electrically tunable p-n diodes in a mono-

- layer dichalcogenide[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(04): 262–267.
- [5] Guo J X, Xie R Z, Wang P, et al. Infrared photodetectors for multidimensional optical information acquisition [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(01): 40–60.
郭家祥, 谢润章, 王鹏, 等. 多维度红外光电探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(01): 40–60.
- [6] Guo Y J, Tang S X, Jiang X Q, et al. Damage inspection of optical surface based on galvanometer scanning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(06): 125–131.
郭亚晶, 唐顺兴, 姜秀青, 等. 基于振镜扫描方式的光学元件表面损伤检测[J]. *光学学报*, 2017, 37(06): 125–131.
- [7] Lu J, Xie Z J, Zhang H C. Light beam induced current mapping to characterize damage characteristics of silicon solar cell irradiated by continuous-wave laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(02): 94–101.
陆健, 谢知健, 张宏超. 连续激光辐照硅太阳能电池损伤特性的光束诱导电流表征[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(02): 94–101.
- [8] Wallmark J T. A new semiconductor photocell using lateral photoeffect [J]. *Proceedings of the IRE*, 1957, 45(04): 474–483.
- [9] Bajaj J, Bubulac O L, Newman R P, et al. Spatial mapping of electrically active defects in HgCdTe using laser beam-induced current[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1987, 5(05): 3186–3189.
- [10] Xing Y H, He W X, Han Z S, et al. Ultrasensitive and broad-spectrum photodetectors based on InSe/MoTe₂ heterostructure [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, 43(03): 316–323.
邢艳辉, 贺雯馨, 韩梓硕, 等. 基于 InSe/MoTe₂ 异质结构的超灵敏宽光谱光电探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2024, 43(03): 316–323.
- [11] Wang B H, Xing Y H, He W X, et al. High performance and broadband photodetectors based on SnS₂/InSe heterojunction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, 42(05): 659–665.
王冰辉, 邢艳辉, 贺雯馨, 等. 基于 SnS₂/InSe 异质结的高性能宽带光电探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2023, 42(05): 659–665.
- [12] Hu Z T, Gan T, Du L, et al. A novel photodetector based on Graphene/InAs quantum dots /GaAs hetero-junction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(03): 269–274.
胡之厅, 甘桃, 杜磊, 等. 基于石墨烯/砷量子点/砷化镓异质结新型光电探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(03): 269–274.
- [13] Zheng J J, Bao B B, Lin C, et al. Air-stable and UV-NIR broadband photodetectors utilizing graphene and core/shell quantum dots hybrid heterostructure [J]. *Optics and Laser Technology*, 2025, 181: 111768.
- [14] Chen Z B, Fan L, Xiao W J, et al. Directional error analysis of 2D galvanometer scanning system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(02): 180–186.
陈志斌, 范磊, 肖文健, 等. 二维振镜扫描系统调向误差分析[J]. *应用光学*, 2018, 39(02): 180–186.
- [15] Sun H L, Lin S Z. Research on errors reasons in dual-galvanometric laser scanning manufacturing [J]. *Laser and Infrared*, 2005, 35(03): 161–163.
孙会来, 林树忠. 双振镜激光扫描加工误差原因分析[J]. *激光与红外*, 2005, 35(03): 161–163.
- [16] SHI Yu-Bin, SI Lei, MA Yan-Xing. New Progress of Beam Scanning Technology [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2013, 50(08): 223–229.
师宇斌, 司磊, 马阎星. 光束扫描技术研究新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(08): 223–229.
- [17] Ma T X, Liang C, Han Y T, et al. Super-resolution imaging enhancement through a 2D scanning galvanometer: algorithm formulation and application in aerial optoelectronic systems [J]. *Photonics*, 2023, 10(11): 10111203.
- [18] Xu Z Q, Duan X C, Zhu Y, et al. On galvanometer laser projection positioning to layups of large composite material [J]. *Machines*, 2023, 11(02): 215–215.
- [19] Ding Y T, Zhang J, Guo Y, et al. Analysis and correction algorithm of pincushion distortion in galvanometer scanning [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2024, 61(13): 257–262.
丁宇韬, 张军, 郭遥, 等. 振镜扫描枕形畸变分析及校正算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13): 257–262.
- [20] Qin X Y, Su D, Jia X Y, et al. Dislocation correction algorithm for adaptive laser confocal high-speed scanning microscopic imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(01): 417–426.
秦小云, 苏丹, 贾新月, 等. 自适应激光共焦高速扫描显微成像错位校正算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(01): 417–426.
- [21] Gong Y C, Zhu Q, Li B Y, et al. Elemental de-mixing-induced epitaxial kesterite/CdS interface enabling 13%-efficiency kesterite solar cells [J]. *Nature Energy*, 2022, 7(10): 966–977.
- [22] Christian N, Ali S, Souhaib O, et al. Spatially resolved opto-electrical performance investigations of Cu₂Zn-SnS_{3.2}Se_{0.8} photovoltaic devices [J]. *Energy Science and Engineering*, 2018, 6(05): 563–569.
- [23] Gong Y C, Zhang Y F, Erin J, et al. Sn⁴⁺ precursor enables 12.4% efficient kesterite solar cell from DMSO solution with open circuit voltage deficit below 0.30 V [J]. *Science China Materials*, 2020, 64(01): 52–60.
- [24] Pan X Y, Li X Y, Yang Y T, et al. 12.3% efficient low voc loss pure sulfide kesterite solar cells from DMSO solution via Cadmium alloying [J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(38): 1–10.
- [25] Gong Y C, Zhang Y F, Zhu Q, et al. Identifying the origin of the voc deficit of kesterite solar cells from the two grain growth mechanisms induced by Sn²⁺ and Sn⁴⁺ precursors in DMSO solution [J]. *Energy and Environmental Science*, 2021, 14(04): 2369–2380.
- [26] Gong Y C, Xin H, Ding L M. Voc deficit in kesterite solar cells [J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, 42(10): 100201.