第 47 卷　第 5 期
2025 年 10 月

光　学　仪　器
OPTICAL INSTRUMENTS

Vol. 47, No. 5
October, 2025

文章编号：1005-5630(2025)05-0031-07　　**DOI**: 10.3969/j.issn.1005-5630.202403080044

用于二维光电器件的高分辨率光电流成像系统

陈渊博，郭旭光
（上海理工大学 光电信息与计算机工程学院，上海 200093）

摘要：光电流扫描成像能够反映二维材料光电器件的材料均匀性和电势分布等信息，是一种重要的测试技术。目前国内相关报道中关于光电流扫描系统的搭建缺少系统性的步骤介绍，尤其是关于提高扫描分辨率的聚焦光路搭建方法的描述更是一笔带过。为了让国内科研人员减少在模糊步骤中的长时间试错，结合高效空间滤波系统搭建了一种能提高成像分辨率的光电流扫描显微成像系统，其空间分辨率接近衍射极限。基于该系统，实现了对基于 MoS_2 二维半导体材料的光电探测器中电子–空穴对的激发和输运测量，研究了金属–半导体肖特基势垒附近的光电流分布，对光电流的形成机制进行了简要分析。该系统的成功搭建可使一些中小型实验室较为方便地仿照搭建相应的光电流扫描系统，以降低试错成本，提高对二维材料光电器件的研究能力。

关键词：二维材料；光电探测器；光电流扫描；二硫化钼
中图分类号：TN 29　**文献标志码**：A

High-resolution photocurrent imaging system for two-dimensional optoelectronic devices

CHEN Yuanbo，GUO Xuguang
（School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology Shanghai 200093, China）

Abstract: Photocurrent scanning imaging is an important test technique for revealing the material uniformity and potential distribution of two-dimensional material optoelectronic devices. However, current domestic reports lack systematic descriptions of photocurrent scanning systems construction, particularly regarding focusing optical path assembly methods for improving scanning resolution. To reduce trial-and-error costs for researchers, this study integrates an efficient spatial filtering system to develop a high-resolution photocurrent scanning microscopy system approaching the diffraction limit. It realized a high-resolution photocurrent scanning microscopy imaging system with spatial resolution close to the diffraction limit which was combined with efficient spatial filtering system. The measurements of excitation and transport of electron-hole pairs in photodetectors based on MoS_2 two-dimensional semiconductor materials were demonstrated. It also

收稿日期：2024–03–08
基金项目：国家自然科学基金（61731020）
第一作者：陈渊博 (1998—)，男，硕士研究生，研究方向为光电流扫描。E-mail：1637963140@qq.com
通信作者：郭旭光 (1972—)，男，研究员，研究方向为太赫兹技术。E-mail：xgguo_sh@qq.com

systematically studied the distribution of photocurrent near the asymmetric Schottky junctions and briefly analyzed the mechanism of photocurrent formation. The system can be adopted in some medium and small-sized laboratory in China to conveniently replicate and build their own photocurrent scanning systems, which reduces some trial-and-error costs and greatly improves the research ability of two-dimensional material optoelectronic devices.

Keywords: two-dimensional material; photodetector; photocurrent scanning; MoS_2

由于在微电子和光电子领域的潜在应用前景，基于二维材料的光电子器件，特别是光电探测器近年来成为研究热点，并取得了显著进展[1]。过渡金属硫族化物（transition metal dichalcogenides，TMDCs）二维半导体材料具有优异的材料稳定性、独特的层状结构、良好的电子迁移率等特性，在光电探测器、场效应晶体管、传感器、太阳能电池等领域展现出巨大的应用前景[2-4]。基于不同二维材料堆叠的范德华异质结可用于制备具有复杂功能的光电子器件。利用光–物质相互作用来进行测试是研究二维半导体材料和器件性质的重要手段之一。而光–电流测量能同时揭示光激发和光生载流子的输运机制，被广泛应用在光电探测器和其他光电子器件的特性研究中[4]。

但是在大多数情况下，研究者都是对在全局照明下的器件进行研究（即光斑大于器件尺寸），因为这样能快速获取器件的光电流响应和时间常数等信息[5-6]。但基于二维材料的光电器件中的光电流产生过程包含丰富的机制，无法在全局照明的条件下分析光电流产生所对应的具体物理效应。因此，扫描光电流成像系统（scanning photocurrent imaging system，SPIS）[7-13]就显得尤为重要。该系统能将小直径聚焦光斑照射在器件区域内，根据不同位置处器件所产生的光电流来具体分析二维光电器件的光电流产生机理[11,14-16]。但相关文献报道中缺少对光电流扫描成像系统搭建方法的具体介绍，尤其是聚焦光路部分仅有简要描述，缺乏实现该类系统的关键技术细节。

基于上述情况，设计并搭建了一套高分辨率扫描光电流系统，并详细介绍了聚焦光路的具体搭建过程。利用自行搭建的光电流扫描成像系统分析研究了 MoS_2 与金属电极界面接触产生的非对称肖特基势垒对光电流分布的影响，验证了该系统具备较高的空间分辨率、较好的微弱信号提取能力和良好的扩展性。

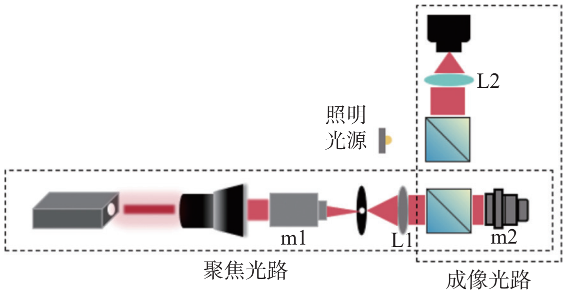
1　系统原理和设计

光电流扫描系统能记录器件不同位置处的电流信号，并将这些数据信号值结合二维坐标绘制成二维图像。本研究设计了一个包含聚焦与成像的光路结构，并通过 LabVIE 上位机控制软件对二维位移台、源表和锁相放大器等电学测量仪器进行编程控制，实现了自动运动扫描、数据保存和图像绘制等操作。程序的总体框架包括仪器连接、运动参数设置、运动控制与测试、数据保存等多个功能模块。同时，还对多个子状态的内部结构分别进行了细化完善。

1.1　光路设计

接近衍射极限的聚焦激光光斑是实现高质量光电流扫描成像的关键。采用共聚焦显微镜光路对激光进行聚焦，对应的框图如图 1 所示，系统光路主要由聚焦光路和成像光路组合而成。所选择的光源是波长（λ）为 780 nm 的飞秒激光器（Menlo systems C–Fiber–780），其光束质量非常高，M_2因子为 1.08。也可以根据实验需求选择其他频段的激光光源。激光光束通过扩束、第一次聚焦、滤波、准直、第二次聚焦后成为直径小于 1 μm 的光斑。飞秒激光光束在较短的传输距离内可近似为平行光束，经扩束器扩束后，可得到一束放大的平行光束。随后，通过光阑限定光束横向面积。通过 10×物镜（m1）对平行光束进行第一次聚焦，在其焦斑处放置一个直径为 50 μm 的空间滤波针孔光阑，滤除杂散光，用焦点与针孔光阑重合的长焦距凸透镜（L1）将通过针孔的光准直，最后经过 50×物镜（m2）聚焦。滤波系

统中的针孔光阑除了滤除杂散光外，还能充当调控聚焦光斑最终大小的闸门。



L2. 成像光路长焦透镜。

图 1　聚焦光路和成像光路结构图

Fig. 1　Structure diagram of focus path and imaging path

单模激光一维径向分布函数(即聚焦光斑直径)为

$$D(x) = A \cdot \exp\left(-x^2/2\sigma^2\right) \tag{1}$$

式中：A 为激光的最大振幅；x 为径向坐标上光斑边缘到光斑中心的距离；σ 为该系统中激光光斑的发散程度。当针孔光阑的直径 $d>6\lambda \cdot f_1/2\pi\sigma$ (f_1 为 m1 凸透镜焦距)时，聚焦光斑最小直径基本不变；当 $d<6\lambda \cdot f_1/2\pi\sigma$ 时，聚焦光斑直径随 d 的减小而减小[17]。此外，聚焦光斑直径还与凸透镜 L1 的焦距 f_2 和物镜 m1 的焦距 f_1 的比值有关，两者的比值越大，理论上最终可聚焦的最小光斑直径越小。此外，用来聚焦光斑的 m2 物镜的焦距也对光斑直径有影响，其焦距越小，则聚焦光斑直径也越小，故对该系统而言必须选择一个短焦的高倍物镜。最终，经过该聚焦光路的光所形成的光斑能够接近衍射极限。

激光经聚焦光路后聚焦在样品上的光斑最小点以及待测器件的像反向通过 m2 物镜，经分束块反射进入到成像光路中。成像光路本质上可以理解为一个无限筒长的显微镜系统，其由聚焦光路中的 m2 物镜和一个长焦透镜(L2)组成。m2 物镜焦点处器件的像和最小光斑的像通过物镜平行出射，再经透镜 L2 后在其焦点处形成一个倒立的实像。最后，将 CMOS 成像阵列(FT–FH1080)放置在透镜 L2 焦点处，通过 CMOS 相机来观察器件的像与光斑聚焦情况。同时，成像光路也起到了定位和选择扫描范围的作用。无限筒长显微镜系统的放大率为

$$\beta = f_b / f_a \tag{2}$$

式中：f_a 与 f_b 分别为物镜和目镜的焦距。又因为聚焦光路与成像光路所使用的是同一个近场物镜，即 f_a 也等于物镜 m2 的焦距，所以选择短焦物镜在提高光斑聚焦效果的同时也能提高成像光路中像的放大倍率，便于观察器件与光斑相对位置的情况。

1.2　运动控制

光电流扫描系统的运动扫描框图如图 2 所示。将待测样品安装于固定在电控二维光学位移台的支架上，位移台上的两个步进电机(西格玛光机，OSMS20–85)，行程范围为 80 mm，整步分辨率为每脉冲 2 μm，半步分辨率为每脉冲 1 μm，最大速度为 80 mm/s，可实现 1/4 步分辨

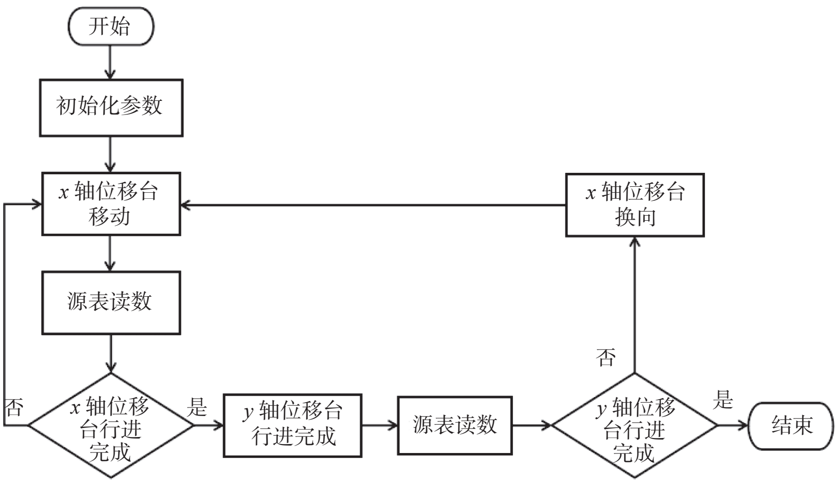
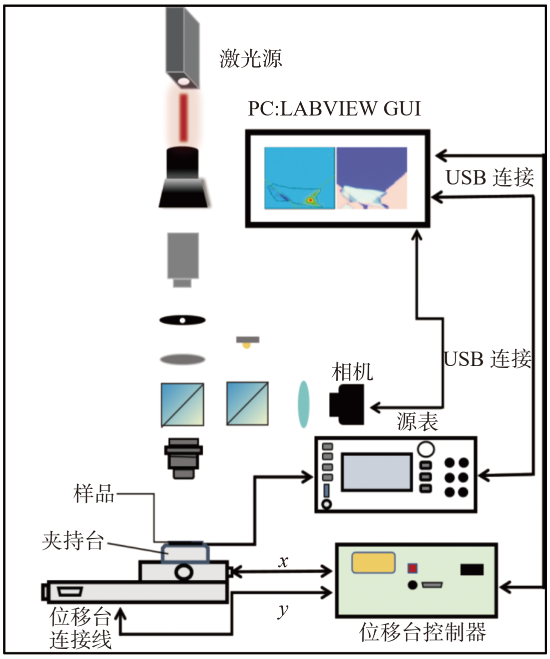


图 2　运动扫描结构框图

Fig. 2　Block diagram of motion scanning structure

率的高精度脉冲。将光学位移台连接到控制器上(西格玛光机，SHOT–304GS)，再通过计算机进行自动控制扫描。采用数字源表(Keithley，2450)来测量扫描过程中的电学性能。利用 LabVIE 自主编写程序实现数据采集和运动控制。程序的总体框架为一个有限状态机，在多种控制状态中最为核心的是运动控制与测试状态。在光电流扫描成像过程中，需要保证步进电机每行进一步，源表便进行一次测试，并记录下该点的数据以及坐标。此外，为了让步进电机按照设定好的器件范围来进行扫描，电机的运动状态需严格按照设定来进行。设器件扫描范围为 $m\Delta l_1 \times n\Delta l_2$，其中 m 为 x 行方向的扫描步数，Δl_1 为 x 方向步长，n 为 y 列方向扫描步数，Δl_2 为 y 方向步长。扫描时，x 方向单轴电机行进一步后，y 轴电机需行进 n 步，完成一列扫描。之后，x 轴电机再行进一步，y 轴电机再反向扫描一列，如此完成一个循环，最终将设定的扫描范围全部扫描完成。电机运行结束后，以起始扫描点为坐标原点，赋予所有测试数据对应的坐标值，将源表数据与对应坐标导出并保存。至此，数据采集和电机扫描程序全部运行结束，通过绘图软件将保存的测量数据与坐标绘制成光电流表征图。最终搭建完成的光电流扫描系统如图 3 所示。

(a) 光电流扫描系统实物图



(b) 光电流扫描系统结构图

图 3　光电流扫描系统

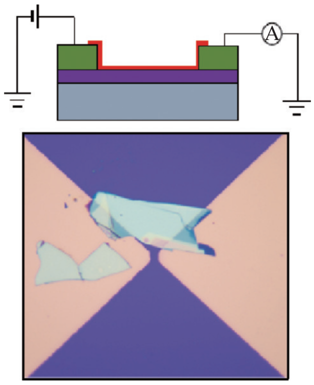
Fig. 3　Photocurrent scanning system

2　系统验证与结果分析

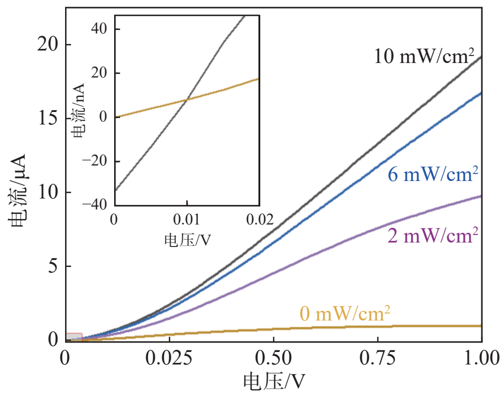
由于搭建系统所用的光源为 780 nm 的飞秒激光器，需要选择带隙小于该波长激光对应光子能量的半导体材料进行光电流扫描实验，对系统性能进行验证和评估。因此选择 MoS_2 来进行光电流扫描测试。在 TMDCs 中，MoS_2 具有原子级界面和层数关联的能带结构，以及高光响应和低暗电流的特点，在光电探测领域具有非常明显的优势。与体材料相比，MoS_2 具有良好的光吸收率，可以对从紫外(UV)到红外(IR)的宽带光谱做出响应，这主要归因于层状 MoS_2 与光之间可以产生强烈的相互作用[6,18]。单层 MoS_2 具有 1.8 eV 的直接带隙，而多层 MoS_2 为间接带隙，带隙值约为 1.29 eV。其带隙值会随着材料层数的减小而增大。与其他二维材料一样，MoS_2 层间仅存在较弱的范德华力，因此可通过机械剥离获得单层或少层无表面悬挂键的 MoS_2 二维材料。同时 MoS_2 中 Mo 原子与 S 原子以很强的共价键连接，这种结构使得 MoS_2 在相同条件下的机械强度是钢铁的几十倍[5,19]。室温下单层 MoS_2 场效应晶体管的电流开关比可达 10^8，有效电子

迁移率为 700 $cm^2/(V·s)$。在稳定状态下 MoS_2 耗能是传统硅晶体管的 1/100 000，其光响应特性也远优于石墨烯器件，因而被广泛应用于柔性光电探测器、锂电池电极等领域。

设计制作了一个两端肖特基接触的 MoS_2 光伏器件。将通过机械剥离法剥出的二硫化钼转移到两端的 Cr/Au 金属电极上，如图 4(a)所示。从该器件的光学显微镜图上可测得 MoS_2 材料的长和宽分别约为 80 μm 和 30 μm。



(a) MoS_2 器件的结构



(b) 器件的 I–V 曲线

图 4　器件结构与不同光功率下的 I–V 曲线

Fig. 4　Device structure and I–V curves at different optical powers

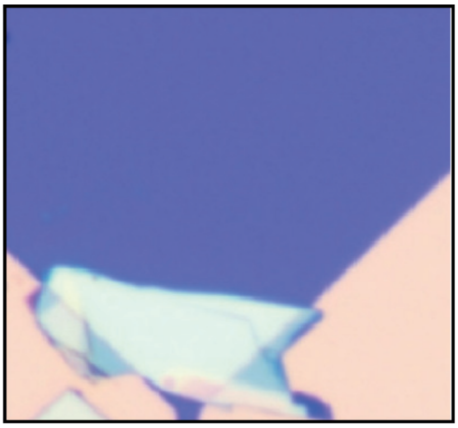
首先在全局照明(780 nm 激光)下，对器件的性能进行测试。在样品表面产生一个直径约为 500 μm 的光斑(确保光斑完全覆盖器件)。图 4(b)显示了该器件在暗条件下和不同激光光照功率密度下的电流–电压(I–V)特性曲线。可以看到器件在不同功率密度的激光照射下，光电导效应所能达到的饱和电流约为 18 μA。Cr/Au 金属电极的功函数约为 5.1 eV，而 MoS_2 的功函数约为 4.7 eV。在零偏置电压下，金属电极与材料接触处的肖特基结存在一个内建电场[18]。内建电场能有效分离光生载流子，其中电子从金属电极越过势垒向材料移动，而空穴在另一侧从材料向电极移动，最终在零偏置电压下形成光电流。图 4(b)所示为偏置电压从 0 增加到 1 V 的扫描过程中，器件总的光电流随着光照功率的增大而增大，但零偏置电压下高光照功率产生的光电流反而小于低光照功率下产生的光电流，如图 4(b)所示。

接下来，用光电流扫描成像系统对 MoS_2 器件在局域光照明情况下的响应进行测量。由于在激光准直扩束的基础上加入了附带空间滤波的二次准直，最终在聚焦平面的激光振幅分布可以分为两部分：激光束被聚焦物镜聚焦的最终光斑以及针孔光阑经光路整体构成的耦合透镜组所成的像。瑞利判据为

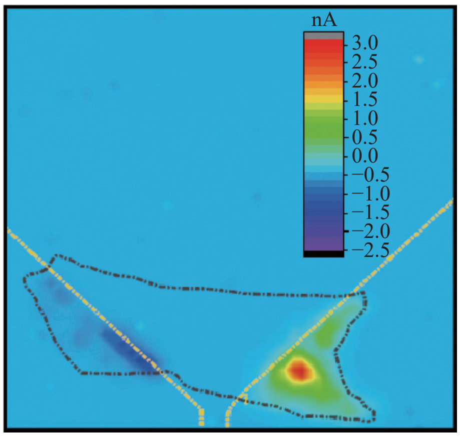
$$\theta = 0.61 \cdot \lambda / A_n \tag{3}$$

式中：θ 为光斑最小分辨角；λ 为入射光波长；A_n 为数值孔径。由式(3)可知，在光学系统中光斑要达到衍射极限，可通过减小入射波波长或增大数值孔径来实现。在本次测量中使用的是 780 nm 的激光，波长恒定，聚焦系统所用近场物镜的数值孔径 $A_n = 0.42$，通过调节光学系统使准直滤波最终进入聚焦物镜的平行光束刚好能覆盖聚焦物镜的入瞳。理想情况下，激光经过该光学系统后可以得到直径为 1.13 μm 左右的光斑，由于激光经过光学系统存在损耗，进一步调节衰减片适当减小激光功率，最终可以得到直径小于 1 μm 的光斑。图 5(a)是 MoS_2 器件扫描区域的光学显微图，通过聚焦光路可获得直径约 1 μm 的光斑，利用成像光路，微调器件位置使光斑处于聚焦镜头焦平面，移动二维位移台将光斑照射在器件需扫描范围的起始点位。源漏电压保持在 0 V，扫描过程中保持环境黑暗，避免环境光干扰。由于器件本身不发光，在成像光路中需添加辅助照明光路，以方便调整器件位置。在扫描前需将照明光关闭，确保无环境光干扰。在 MoS_2 光电探测器中，MoS_2与金属电极为肖特基接触，在结区存在内建电场，可以分离光激发的电子–空穴对，从而产生光电流。图 5(b)所示为零偏置电压下的光电流扫描图，x 和 y 方向上的步长都设

置为 1 μm。具体扫描流程为：沿 x 方向移动 1 步，完成 y 方向全部扫（正向），随后沿 x 方向再移动 1 步，完成 y 方向反向扫描，循环该过程直至扫描结束。从图 5(b)可以观察到光电流只在金属与 MoS_2 交叠区以及金属–MoS_2 接触边缘产生。通过等高线伪彩色图上的光电流分布可以看到，金属与材料接触区域材料的大致轮廓。除金属–MoS_2 交叠区外，其他区域未检测到光电流；当光斑远离接触界面时，光电流趋近于零。此外，在金属–MoS_2 交叠区产生的光电流是不均匀的，存在明显的强弱分布。这种空间不均匀的光电流的产生是因为机械剥离法制备的 MoS_2 材料层厚度不均匀所导致的。厚度不均的材料与金属接触产生的肖特基势垒会不同，另外在不同厚度界面处沾上不同程度的污染物也会影响光电流的产生。根据上述现象可以判断，某一厚度的 MoS_2 与金属电极接触的位置处会存在一个非常强的电流响应。



(a) MoS_2 探测器需扫描区域的光学图像



(b) 零偏压时的 MoS_2 探测器的光电流扫描图

图 5　器件的光电流扫描范围与扫描结果

Fig. 5　The photocurrent scanning range and scanning result of the device

通过分析 MoS_2 光电探测器表面光电流分布，可以揭示其响应机理，同时根据电流强度差异可以定位主要响应区域。以上测量结果表明，空间分辨光电流的分布对揭示二维材料光电器件的工作机理和性能具有重要意义。同时，也验证了自主搭建的高分辨率光电流扫描系统的性能，其能有效表征探测器表面的光电流分布。

3　总　结

搭建了一套高空间分辨率的扫描光电流成像系统，该系统可用于绘制基于二维材料的光电器件的光电流响应分布图，其聚焦光路所能获得的最小光斑直径可达 1 μm。在本次测量中使用了恒定波长为 780 nm 的激光作为光源，后续为进一步提高分辨率与测试精度，可以使用波长更短的激光作为光源。本文详细介绍了扫描光电流系统的结构，包括光路、程序控制和测试流程，为其他的中小型实验室自主搭建光电流扫描系统提供了参考。通过对 MoS_2 器件的测量，分析了其响应机理与性能，验证了系统的可行性。结果显示，该系统具有优异的性能和分辨率，为深入探究器件内部载流子输运机制及光电响应机理提供了重要支撑，同时为高性能光电器件的优化设计指明了研究方向。

参考文献：

[1] 王根旺, 侯超剑, 龙昊天, 等. 二维半导体材料纳米电子器件和光电器件 [J]. 物理化学学报, 2019, 35(12): 1319 – 1340.

[2] WANG Q H, KALANTAR-ZADEH K, KIS A, et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(11): 699 – 712.

[3] RAMASUBRAMANIAM A. Large excitonic effects in monolayers of molybdenum and tungsten dichalcogenides[J]. Physical Review B, 2012, 86(11): 115409.

[4] ZHANG Y Z, LIU T, MENG B, et al. Broadband high photoresponse from pure monolayer graphene photodetector[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 1811.

[5] AHN J, JEON P J, RAZA S R A, et al. Transition metal dichalcogenide heterojunction PN diode toward ultimate photovoltaic benefits[J]. 2D Materials, 2016, 3(4): 045011.

[6] FURCHI M M, POLYUSHKIN D K, POSPISCHIL A, et al. Mechanisms of photoconductivity in atomically thin MoS_2[J]. Nano Letters, 2014, 14(11): 6165 – 6170.

[7] REUTER C, FRISENDA R, LIN D Y, et al. A versatile scanning photocurrent mapping system to characterize optoelectronic devices based on 2D materials[J]. Small Methods, 2017, 1(7): 1700119.

[8] DE VITTORIO M, CINGOLANI R, MAZZER M, et al. Sub-micron photocurrent mapping of heterostructures by micro-probe optical-beam induced current[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(8): 3429 – 3431.

[9] MCNEILL C R, FROHNE H, HOLDSWORTH J L, et al. Direct photocurrent mapping of organic solar cells using a near-field scanning optical microscope[J]. Nano Letters, 2004, 4(2): 219 – 223.

[10] AHN Y, DUNNING J, PARK J. Scanning photocurrent imaging and electronic band studies in silicon nanowire field effect transistors[J]. Nano Letters, 2005, 5(7): 1367 – 1370.

[11] XIA F N, MUELLER T, GOLIZADEH-MOJARAD R, et al. Photocurrent imaging and efficient photon detection in a graphene transistor[J]. Nano Letters, 2009, 9(3): 1039 – 1044.

[12] PARK J K, SON B H, PARK J Y, et al. High-speed scanning photocurrent imaging techniques on nanoscale devices[J]. Current Applied Physics, 2013, 13(9): 2076 – 2081.

[13] LIU F Z, KAR S. Quantum carrier reinvestment-induced ultrahigh and broadband photocurrent responses in graphene–silicon junctions[J]. ACS Nano, 2014, 8(10): 10270 – 10279.

[14] WOESSNER A, ALONSO-GONZÁLEZ P, LUNDEBERG M B, et al. Near-field photocurrent nanoscopy on bare and encapsulated graphene[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 10783.

[15] 吕磊, 苏丹, 杨毅, 等. 显微激光诱导电流技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12): 211 – 222.

[16] BRITNELL L, RIBEIRO R M, ECKMANN A, et al. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films[J]. Science, 2013, 340(6138): 1311 – 1314.

[17] 朱延彬, 马俊富. 激光微束装置中的聚焦系统 [J]. 中国激光, 1991, 18(5): 337 – 340.

[18] DESAI S B, MADHVAPATHY S R, SACHID A B, et al. MoS_2 transistors with 1-nanometer gate lengths[J]. Science, 2016, 354(6308): 99 – 102.

[19] YOON Y, GANAPATHI K, SALAHUDDIN S. How good can monolayer MoS_2 transistors be?[J]. Nano Letters, 2011, 11(9): 3768 – 3773.

（编辑: 李晓莉）