

光损伤肖特基钙钛矿探测器的光电特性分析

曲家沂 王云鹏 孙俊杰 陈飞 赵东旭 田灿灿

Analysis of photoelectric characteristics of a light-damaged schottky perovskite detector

QU Jia-yi, WANG Yun-peng, SUN Jun-jie, CHEN Fei, ZHAO Dong-xu, TIAN Can-can

引用本文:

曲家沂, 王云鹏, 孙俊杰, 陈飞, 赵东旭, 田灿灿. 光损伤肖特基钙钛矿探测器的光电特性分析[J]. 中国光学, 2022, 15(4): 668–674. doi: 10.37188/CO.2021-0196

QU Jia-yi, WANG Yun-peng, SUN Jun-jie, CHEN Fei, ZHAO Dong-xu, TIAN Can-can. Analysis of photoelectric characteristics of a light-damaged schottky perovskite detector[J]. Chinese Optics, 2022, 15(4): 668-674. doi: 10.37188/CO.2021-0196

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0196>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Se和有机无机钙钛矿异质结的宽光谱光电探测器制备及其光电特性研究

Fabrication and photoelectric properties of organic-inorganic broad-spectrum photodetectors based on Se microwire/perovskite heterojunction

中国光学. 2019, 12(5): 1057 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1057>

飞秒脉冲激光对硅基多层膜损伤特性

Femtosecond pulsed laser induced damage characteristics on Si-based multi-layer film

中国光学. 2019, 12(2): 371 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0371>

高反射光学薄膜激光损伤研究进展

Research progress in laser damage of high reflective optical thin films

中国光学. 2018, 11(6): 931 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0931>

集成PIN光敏元的CMOS探测器光电响应特性研究

Study on the photo response of a CMOS sensor integrated with PIN photodiodes

中国光学. 2019, 12(5): 1076 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1076>

超短脉冲激光诱导周期性表面结构

Laser-induced periodic surface structures with ultrashort laser pulse

中国光学. 2018, 11(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0001>

飞秒激光刻写的超短光纤布拉格光栅及其传感特性

Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics

中国光学. 2017, 10(4): 449 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0449>

光损伤肖特基钙钛矿探测器的光电特性分析

曲家沂^{1,2}, 王云鹏^{3*}, 孙俊杰^{1,2*}, 陈 飞¹, 赵东旭³, 田灿灿³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用

国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了研究飞秒激光对光电探测器光学性能的影响, 本文对飞秒脉冲激光辐照 CsPbBr₃ 背靠背肖特基光电探测器的损伤特性, 以及不同激光功率密度下的光电性能进行了研究。利用化学气相沉积法在 ITO 叉指电极上沉积 CsPbBr₃ 微米晶薄膜, 制备了背靠背肖特基型全无机钙钛矿光电探测器。利用脉冲宽度为 35 fs 的钛宝石飞秒激光器辐照 CsPbBr₃ 光电探测器, 通过显微镜观察不同激光功率密度下 CsPbBr₃ 多晶薄膜的损伤形貌, 并研究了不同功率密度损伤下肖特基结构的钙钛矿光电探测器的光电性能变化。结果表明: 自制的全无机金属卤化物肖特基光电探测器具有较高的损伤阈值, 达到了 2.1 W/cm², 并且在样品轻度损伤的情况下, 样品的光电特性出现了一定程度的提升, 光谱响应度出现了 50 nm 的展宽, 并且在部分薄膜受热脱落后, 器件仍然保持一定的光电探测性能。

关键词: 飞秒激光; 激光损伤; 光电探测器; 光响应特性; 光谱响应度

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2021-0196

Analysis of photoelectric characteristics of a light-damaged schottky perovskite detector

QU Jia-yi^{1,2}, WANG Yun-peng^{3*}, SUN Jun-jie^{1,2*}, CHEN Fei¹, ZHAO Dong-xu³, TIAN Can-can³

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangyunpeng@ciomp.ac.cn; 15143115236@163.com

Abstract: To understand the effects of femtosecond lasers on the optical performance of the photodetectors, the damage characteristics of a CsPbBr₃ back-to-back Schottky photodetector irradiated by femtosecond

收稿日期: 2021-11-09; 修订日期: 2021-12-01

基金项目: 中国科学院创新交叉团队 (No. JCTD-2020-13); 自然科学基金面上项目 (No. 11874352); 国家自然科学基金青年基金 (No. 61805237); 中科院长春光机所重大创新项目 (No. E10302Y3M0)

Supported by Innovative Cross Team of the Chinese Academy of Sciences (No. JCTD-2020-13); National Natural Science Foundation of China (No. 11874352, No. 61805237), Innovation Project of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (No. E10302Y3M0)

pulses and its photoelectric performance under various laser energy densities were evaluated. A CsPbBr₃ microcrystal film on the ITO interdigital electrode was deposited by chemical vapor deposition and a back-to-back Schottky type all-inorganic perovskite photodetector was prepared. The CsPbBr₃ photodetector was irradiated by a Ti:Sapphire femtosecond laser with a pulse width of 35 fs. The damage morphology of the CsPbBr₃ polycrystalline film under different laser energy densities was observed using a microscope, and the photoelectric performance of the Schottky-structure perovskite photodetector damaged under different energy densities was evaluated. Results suggest that the damage threshold of the self-made all-inorganic metal halide Schottky photodetector is as high as 2.1 W/cm², and when the sample is slightly damaged, the photoelectric characteristics of the sample are improved to a certain extent and the spectral responsivity is broadened by 50 nm. As part of the film is heated off, the sample still maintains a certain level of detection performance.

Key words: femtosecond laser; laser damage; photodetector; optical response characteristics; spectral responsivity

1 引言

钙钛矿材料由于其特殊的晶体结构具备载流子速率低、光谱吸收可调、载流子迁移率高等特性^[1-2],通过无机元素Cs的掺杂替换有机-无机钙钛矿材料中的有机阳离子获得的全无机金属卤化物钙钛矿材料CsPbX₃(X=Cl、Br或I),既有着比有机-无机钙钛矿材料更加稳定的结构,还保持着有机-无机钙钛矿材料带宽可调、吸收波长范围广、吸收系数高、载流子寿命长等优点,在光电子器件方面有着巨大的应用潜力。

目前光电探测器通常由Si、InGaAs、InSb、HgCdTe等半导体材料制成,虽然它们有着良好的稳定性和灵敏度,但在实际生产中对晶体质量要求极高,且需要严格把控材料的生长,制作难度大、成本高^[3-5],而通过化学气相沉积法(Chemical Vapor Deposition, CVD)制备全无机金属卤化物钙钛矿薄膜平整度高、缺陷水平低、沉积速率可调、可重复性高,制备出的半导体薄膜材料能够很好地与衬底材料相结合,并可以通过调控化学气相沉积过程中的参数控制晶体的生长,有效提高肖特基结势垒高度,易于改进器件性能且制备成本较低,近年来受到广泛关注,有许多关于钙钛矿光电探测器的报道,如Shi等人于2016年利用CVD法在500℃和520℃下分别沉积卤化物CsX和PbX₂,最终在云母衬底上成功制备出CsPbX₃线状的探测器材料^[6];同年Park等人控制

粉末源温度在570~600℃、Si衬底温度在350~380℃,通过CVD法制备了表面光滑、质量高、具有法布里-珀罗腔功能的CsPbX₃线状探测器材料^[7];2017年Zhou等人利用CVD法在Si/SiO₂衬底上制备出三角截面的CsPbX₃线状探测器材料以及蓝宝石衬底下面内排列的线状探测器材料^[8];2018年Huang等人用CVD法通过将反应炉温度控制在530℃制备了沿纳米线方向梯度分布的CsPbBr_xI_{3-x}线状探测器材料^[9];新加坡南洋理工大学在2016年首次报道了通过CVD法成功制备CsPbX₃片状的探测器材料,在云母衬底上以CsX和PbX₂为反应原料制备CsPbX₃纳米片结构,该结构上下表面间的衍射使纳米片呈现不同颜色^[10],2019年,Zhao等人采用掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的Ga_{0.9}N作为外延层,控制CsBr与PbBr的摩尔比为1:1,在575℃下通过CVD法在裸露的Ga_{0.9}N/蓝宝石衬底上制备晶向固定的CsPbBr₃矩形片状探测器材料^[11];2020年,Li等人通过CVD法将CsBr和PbBr₂以2:1的摩尔比混合,加热至570℃并保温10 min,制备出毫米级的高晶体质量的CsPbBr₃探测器单晶薄膜^[12];同年Liu等人于单温区管式炉系统中,将系统升温至600℃并保持10 min,利用CVD法在充分清洗后的蓝宝石衬底上制备了光增益系数高达 1225 cm^{-1} 的CsPbBr₃探测器单晶薄膜^[13];Dong等人于2015年基于低温溶液法制备厚度为3 mm的MAPBI₃光电探测器,并利用从大块单晶上剥落的片状单晶制备厚度为200 μm的光电探测

器^[4]; Zeng 等人在 2016 年以金叉指作为电极, 通过离心旋涂法制备 CsPbBr_3 薄膜, 最终制成探测度为 10^8 Jones、响应度为 10.04 mA/W 的光电探测器^[5]; 同年 Bakr 等人报道了 Pt 与 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 形成的肖特基结光电探测器, 探测度达到 10^{10} Jones^[6]; Fang 等人在 2018 年通过两步蒸汽转换法在 ITO/玻璃衬底上生长了高度结晶的钙钛矿层, 形成的肖特基势垒能够有效降低器件暗电流, 光电探测器探测度达到 10^{12} Jones^[7]; 2019 年 Tian 等人将 CsBr 和 PbBr_2 以 1:1 的摩尔比混合, 在 610°C 下通过 CVD 法在 ITO 叉指电极上直接生长 CsPbBr_3 微米晶薄膜, 制成背靠背肖特基型高性能可见光探测器^[1]。

光电探测器在军事上有着重要的应用, 光电探测器的阈值条件决定了器件的应用场景, 研究不同参数激光下光电探测器的光电性能变化有着十分重要的应用价值, 而国内外关于飞秒激光损伤钙钛矿材料对光电探测器光电性能影响的报道很少, 因此本文通过化学气相沉积法在 ITO 叉指电极上生长肖特基多晶 CsPbX_3 薄膜, 并开展了飞秒激光辐照 CsPbBr_3 背靠背肖特基结光电探测器的实验研究。

2 实验装置

2.1 实验样品制备

本文采用的 CsPbBr_3 光探测器的衬底为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的石英, 通过激光刻蚀线宽为 $50 \mu\text{m}$ 的 ITO 叉指, 用丙酮、乙醇和去离子水依次超声 10 min 后用 N_2 吹干。将 CsBr 粉末和 PbBr_2 粉末以 1:1 的比例混合, 充分研磨后取 0.15 g 粉末与石英衬底共同放置在陶瓷舟中, 混合粉末置于反应炉加热中心, ITO 叉指衬底置于陶瓷舟下游 12 cm 处。实验开始前排出空气, 在 50 Pa 的压强下将反应炉加热到 610°C , 以 100 ml/min 的氩气作为反应载气, 保持 20 min 后关闭电源, 自然冷却后, 石英衬底上生长的黄色物质即为 CsPbBr_3 微米晶薄膜, 样品结构如图 1 所示。

通过场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 表征样品形貌, 如图 2(a) 所示, 可以观察到 CsPbBr_3 薄膜由许多微米级晶体组成, 具有明显晶界, 通过 Bruker D8 系统测试样品的 X 射线衍射图谱

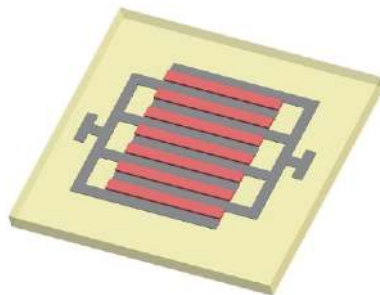


图 1 基于 CsPbBr_3 微米晶薄膜的光探测器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a photodetector based on CsPbBr_3 microcrystal film

(XRD), 测得结果如图 2(b) 所示, 样品显示出锐利的衍射峰。由 SEM 形貌和 XRD 图谱可知, 实验中制备的样品为 CsPbBr_3 多晶薄膜。

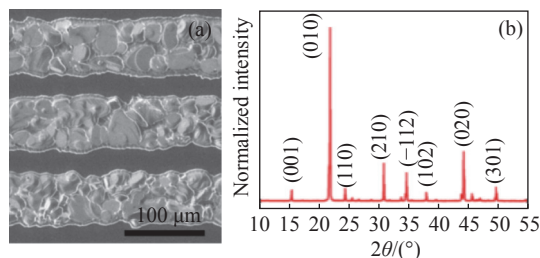


图 2 (a) CsPbBr_3 微米晶薄膜的 SEM 形貌; (b) CsPbBr_3 微米晶薄膜的 XRD 图谱

Fig. 2 (a) Typical SEM images showing the morphology of CsPbBr_3 microcrystal films; (b) XRD spectrum of CsPbBr_3 microcrystal films

2.2 飞秒激光损伤装置

为了探测全无机钙钛矿光电探测器的损伤阈值, 采用中心波长为 800 nm 、脉宽为 35 fs 、重复频率为 1 kHz 的钛宝石飞秒激光器作为辐照光源。图 3 为飞秒激光诱导损伤的实验装置原理图。通过电脑控制激光器输出光束, 调整样品角度, 使飞秒激光垂直入射到样品上, 经准直透镜组调整光斑大小, 使激光光斑刚好覆盖样品表面。实验中先使用多组衰减片使激光功率密度降低至 0.2 W/cm^2 , 再通过改变衰减片数量使入射到样



图 3 飞秒激光损伤系统原理图

Fig. 3 Schematic of the femtosecond laser damage experiment setup

品上的激光功率密度以 0.1 W/cm^2 的梯度递增, 通过电脑控制飞秒激光器在不同条件下分别辐照样品 60 s。

2.3 光电性能测试装置

本文通过显微镜观测到了 CsPbBr_3 薄膜肖特基光探测器在不同功率密度激光下表面形貌的变化, 并针对损伤后一定特征形貌的光电探测器分别进行了光谱响应度测试 (Zolix DSR2810-CC 光电器件光谱响应度测量系统) 及 0 V 光开关比测试 (KEYSIGHT B1500 半导体分析仪)。图 4 为连续性光开关实验装置原理图。实验装置主要由照明光源、斩波器、透镜以及半导体分析仪等组成。照明光源为 400 nm 的连续激光, 斩波器频率设置为 2 Hz, 确保样品辐照时间与停止辐照时间一致且稳定。在无偏置电压的条件下, 用半导体分析仪通过采集连续激光多次重复开关下的光电流数据测试样品的伏安特性, 由伏安特性的变化分析光电探测器响应速度和探测度受到的影响。

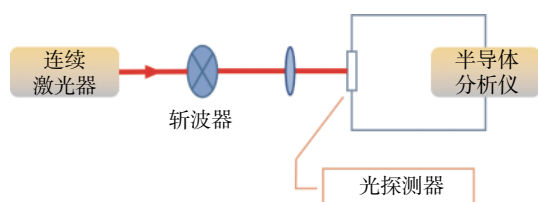


图 4 连续光开关实验系统原理图

Fig. 4 Schematic of the reproducible on/off switch of the device

3 实验结果及分析

3.1 样品表面形貌对比

图 5 显示了飞秒激光辐照 CsPbBr_3 肖特基光探测器表面的损伤效果显微图, 在整个功率密度范围内, 有明显损伤现象。图 5(a) 为未被飞秒激光损伤的显微图。从图中可以看到, 样品仍保持多晶薄膜状态, 没有明显变化。图 5(b) 为功率密度为 2.1 W/cm^2 的激光损伤效果图, 从图中可以看到, 样品被辐射区域晶界减少, 透光性更好, 表明该功率密度下的飞秒激光使薄膜多晶融化重构, 薄膜变得更薄更均匀。图 5(c) 为功率密度为 2.6 W/cm^2 的激光损伤效果图, 从图中可以观察到, 薄膜受到破坏性损伤, 部分 ITO 叉指电极暴

露, 由于飞秒激光呈高斯分布, 辐照区域边缘还保留部分 CsPbBr_3 材料。图 5(d) 为功率密度为 3.2 W/cm^2 的激光损伤效果图, 从图中可以看到, 辐照区域 ITO 叉指电极完全暴露, 且石英衬底表面出现断裂, 表明在该条件下, 钙钛矿材料表面被完全损伤, 且由于石英导热性较差, 样品表面出现裂痕。

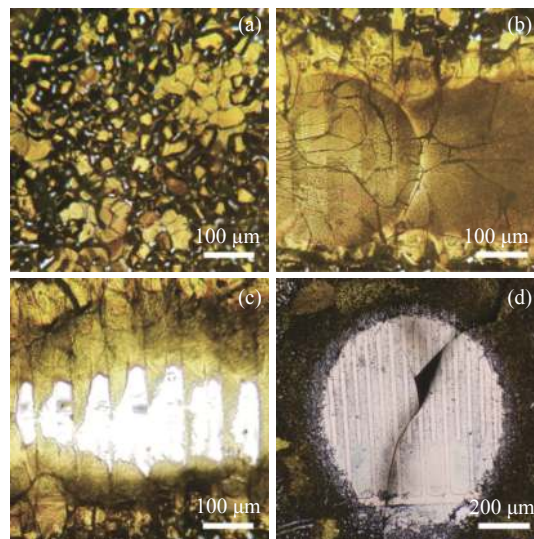


图 5 功率密度为(a) 0 W/cm^2 、(b) 2.1 W/cm^2 、(c) 2.6 W/cm^2 和(d) 3.2 W/cm^2 激光辐照后表面形貌对比

Fig. 5 Micrograph of a sample irradiated by femtosecond pulse lasers with power densities of (a) 0 W/cm^2 , (b) 2.1 W/cm^2 , (c) 2.6 W/cm^2 and (d) 3.2 W/cm^2

3.2 样品光谱响应度变化

图 6(彩图见期刊电子版) 为不同功率密度下飞秒激光辐照 CsPbBr_3 肖特基光探测器后光谱响应度的变化。从图中可以看出, 未被飞秒激光辐照时, CsPbBr_3 薄膜样品的最佳响应波长在 $320 \sim 450 \text{ nm}$ 之间, 在 $450 \sim 475 \text{ nm}$ 之间, 样品的光谱响应度骤降, 在 500 nm 后完全不响应。逐渐增加飞秒激光辐照的功率密度至 2.1 W/cm^2 时, 最佳响应波长在 $320 \sim 500 \text{ nm}$ 之间, 最佳响应波长出现了约 50 nm 的展宽, 且与未损伤的探测器相比, 光谱响应度有较大幅度的提升。结合样品形貌分析, 钙钛矿薄膜吸收飞秒激光能量, 引起多晶薄膜的非热烧蚀现象^[18], 薄膜融化后重新结晶, 形成更薄更均匀的 CsPbBr_3 薄膜。根据光谱响应度:

$$R_v = \frac{\eta(1-r)\tau E}{phwd}, \quad (1)$$

式中, η 为量子效率, r 为表面反射率, τ 为光生载

流子寿命, ρ 为载流子浓度, h 为普朗克常数, ν 为光子入射频率, w 为面积, d 为厚度。由式 (1) 可知, 薄膜厚度减小, 器件光谱响应度增加, 因此在功率密度为 2.1 W/cm^2 的飞秒激光损伤后, 光探测器对光的响应度反而更高; 探测器的光谱响应度在 $500\sim 550 \text{ nm}$ 处骤减, 在 550 nm 后基本不响应。继续增加功率密度至 2.6 W/cm^2 , 可以观察到最佳响应波长依旧在 $320\sim 500 \text{ nm}$ 之间, 但是响应度与前两个阶段相比出现大幅度下降。结合样品在显微镜下的形貌分析, 未被飞秒激光完全损伤的辐照边缘区域对光仍有一定响应, 500 nm 后的变化趋势与上一阶段相同。继续增加功率密度至 3.2 W/cm^2 , 可以观察到光谱响应度十分微弱, 结合显微镜下形貌分析, 完全损伤后的样品对不同波长的光不再具备区别明显的光谱响应特性。

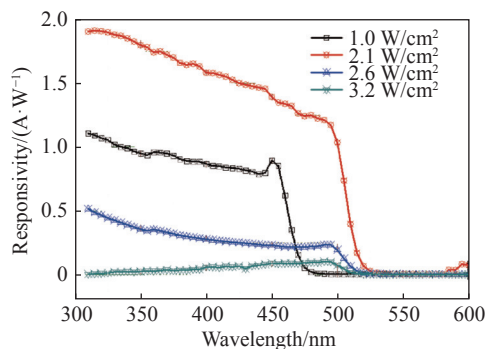


图 6 不同功率密度的飞秒激光损伤后样品的光谱响应度
Fig. 6 Spectral responsivity of a sample after being damaged by a femtosecond laser with different power densities

3.3 样品伏安特性变化

在不同功率密度下飞秒激光辐照 CsPbBr_3 薄膜样品后, 分别进行重复性开关实验, 光电流变化如图 7 所示。未被飞秒激光辐照的光探测器在光开瞬间产生的光电流先瞬间增大至 0.7 pA 左右, 后在 0.5 s 的持续光照时间内略减小, 光关后光电流瞬间下降至零值。增加飞秒激光功率密度至 2.1 W/cm^2 , 辐照后样品在光开瞬间产生的光电流先瞬间增大至 6 pA 左右, 后在 0.5 s 内的持续光照时间内继续增加。随着飞秒激光辐照功率密度的继续增加, 2.6 W/cm^2 的飞秒激光辐照后样品在光开瞬间光电流变化趋势与上一阶段类似, 0.5 s 的持续时间内光电流只能达到 0.2 pA 左右, 并且在光开关瞬间产生明显的反向电流。继续增加飞

秒激光功率密度至 3.2 W/cm^2 时, 样品光电流信号的信噪比极差, 从光电流信号中可分辨出光开与光关, 但无法发挥探测功能。

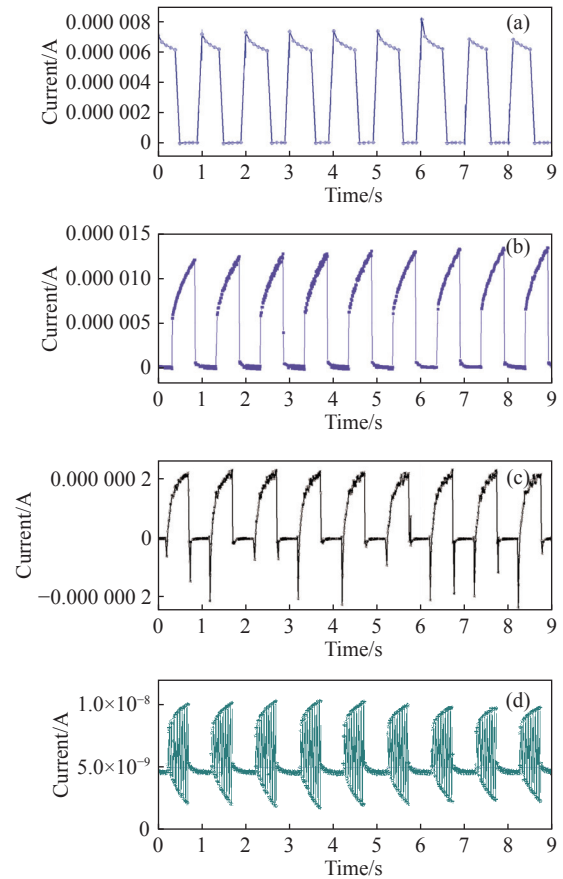


图 7 功率密度为(a) 0 W/cm^2 、(b) 2.1 W/cm^2 、(c) 2.6 W/cm^2 和(d) 3.2 W/cm^2 的飞秒激光辐照后样品光电流产生情况
Fig. 7 Photocurrent generation of a sample irradiated by femtosecond laser irradiation under power densities of (a) 0 W/cm^2 , (b) 2.1 W/cm^2 , (c) 2.6 W/cm^2 and (d) 3.2 W/cm^2

结合显微镜下样品形貌和光谱响应度的变化分析, 功率密度为 2.1 W/cm^2 的飞秒激光损伤后, 多晶薄膜在飞秒激光的非热损伤下融化, 在空气中重组, 重组的薄膜包含更多的缺陷, 缺陷的存在抑制了光生载流子的迁移速率, 由 3.2 节可知在功率密度为 2.1 W/cm^2 的飞秒激光损伤后, 样品的光谱响应度有一定提升, 因此与未被损伤的样品相比, 损伤后的样品光电转化速度更慢、光电转化能力更强。随着激光功率密度的提高, 样品表面从融化重组变为明显损伤, 2.6 W/cm^2 的激光辐照下, 样品暴露出部分叉指电极, 样品表面薄膜面积在飞秒激光的损伤下减少, 导致光照下产生

的光电流变小。随着激光功率密度的继续提高,样品表面完全损坏,基本上对任何波长的光都不响应,此时光电探测器失去探测功能。

4 结 论

本文针对飞秒激光辐照全无机钙钛矿 CsPbBr_3 薄膜肖特基光探测器的研究,进行了不同功率密度下飞秒激光损伤光电探测器的实验,对比了不同条件下激光对光电探测器光电性能的影响。实验结果表明:当入射激光功率密度达到 2.1 W/cm^2 时,样品表面在激光的非热损伤作用

下融化,重组后的薄膜更薄更均匀,响应波长有 50 nm 左右的展宽且样品的光谱响应度有一定程度的提高,由光谱响应度和 0 V 下的光开关电流对比结果可知,轻微损伤的光电探测器光电性能有一定程度的提升;当继续提高入射激光功率密度至 2.6 W/cm^2 时,样品表面部分区域的薄膜受热脱落,暴露出部分 ITO 叉指电极,部分损伤的光电探测器仍保留一定的光探测能力,光谱响应度降低,光开关电流比大幅度降低;当入射激光功率密度达到 3.2 W/cm^2 时,样品表面激光辐照区域薄膜完全脱落,对光基本不响应,光电探测器失去探测能力。

参考文献:

- [1] 田灿灿. 全无机钙钛矿 CVD 制备方法及光电器件的研制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
TIAN C C. *CVD method synthesized all-inorganic perovskite and its development of optoelectronic devices*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [2] 秦昱, 林珍华, 常晶晶, 等. 印刷钙钛矿太阳能电池研究进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1015-1027.
QIN Y, LIN ZH H, CHANG J J, *et al.*. Research progress of printed perovskite solar cells[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1015-1027. (in Chinese)
- [3] 刘艳珍, 李国辉, 崔艳霞, 等. 钙钛矿光电探测器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 010001.
LIU Y ZH, LI G H, CUI Y X, *et al.*. Research progress in perovskite photodetectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 010001. (in Chinese)
- [4] 王兰, 董渊, 高嵩, 等. 钙钛矿材料在激光领域的研究进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 993-1014.
WANG L, DONG Y, GAO S, *et al.*. Research progress of perovskite materials in the field of lasers[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 993-1014. (in Chinese)
- [5] 李今朝, 曹焕奇, 张超, 等. 气相辅助刮刀涂布法制备钙钛矿薄膜[J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1028-1039.
LI J ZH, CAO H Q, ZHANG CH, *et al.*. Vapor assisted doctor blading process to fabricate perovskite thin films[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1028-1039. (in Chinese)
- [6] WANG Y P, SUN X, SHIVANNA R, *et al.*. Photon transport in one-dimensional incommensurately epitaxial CsPbX_3 arrays[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7974-7981.
- [7] PARK K, LEE J W, KIM J D, *et al.*. Light-matter interactions in cesium lead halide perovskite nanowire lasers[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2016, 7(18): 3703-3710.
- [8] ZHOU H, YUAN SH P, WANG X X, *et al.*. Vapor growth and tunable lasing of band gap engineered cesium lead halide perovskite micro/nanorods with triangular cross section[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(2): 1189-1195.
- [9] HUANG L, GAO Q G, SUN L D, *et al.*. Composition-graded cesium lead halide perovskite nanowires with tunable dual-color lasing performance[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(27): 1800596.
- [10] ZHANG Q, SU R, LIU X F, *et al.*. High-quality whispering-gallery-mode lasing from cesium lead halide perovskite nanoplatelets[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(34): 6238-6245.
- [11] ZHAO L Y, GAO Y, SU M, *et al.*. Vapor-phase incommensurate heteroepitaxy of oriented single-crystal CsPbBr_3 on GaN: toward integrated optoelectronic applications[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(9): 10085-10094.
- [12] 李方涛. 卤铅钙钛矿的可控制备及其激光性质调控研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
LI F T. *Research on controllable preparation of lead halide perovskite and it's lasing property regulation*[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021. (in Chinese)
- [13] ZHONG Y G, LIAO K, DU W N, *et al.*. Large-scale thin CsPbBr_3 single-crystal film grown on sapphire via chemical vapor deposition: toward laser array application[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(11): 15605-15615.
- [14] DONG Q F, FANG Y J, SHAO Y CH, *et al.*. Electron-hole diffusion lengths $>175 \mu\text{m}$ in solution-grown $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

- single crystals[J]. *Science*, 2015, 347(6225): 967-970.
- [15] DONG Y H, GU Y, ZOU Y SH, *et al.*. Improving all-inorganic perovskite photodetectors by preferred orientation and plasmonic effect[J]. *Small*, 2016, 12(40): 5622-5632.
- [16] SHAIKH P A, SHI D, RETAMAL J R D, *et al.*. Schottky junctions on perovskite single crystals: light-modulated dielectric constant and self-biased photodetection[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(35): 8304-8312.
- [17] GUAN X W, HU W J, HAQUE A, *et al.*. Light-responsive ion-redistribution-induced resistive switching in hybrid perovskite schottky junctions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(3): 1704665.
- [18] 郑长彬, 邵俊峰, 李雪雷, 等. 飞秒脉冲激光对硅基多层膜损伤特性[J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 371-381.
- ZHENG CH B, SHAO J F, LI X L, *et al.*. Femtosecond pulsed laser induced damage characteristics on Si-based multi-layer film[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 371-381. (in Chinese)

作者简介:



曲家沂(1997—), 女, 吉林延吉人, 硕士研究生, 2019 年于长春理工大学获得理学学士学位, 主要从事新型激光技术方面的研究。E-mail: qujiayi000@163.com



王云鹏(1985—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 2008 年于吉林大学获得学士学位, 2014 年于物理所获得博士学位, 主要从事红外激光开发研制及超快激光的研制及相关化学、生物超快动力学方面的研究。E-mail: wangyunpeng@ciomp.ac.cn



孙俊杰(1994—), 女, 吉林长春人, 硕士, 助理研究员, 2015 年于武汉大学获得学士学位, 2017 年于国防科技大学获得硕士学位, 主要从事新型激光技术方面的研究。E-mail: 15143115236@163.com