

文章编号: 1000-7032(2024)04-0621-09

具有宽带-窄带双功能探测模式的光电探测器

姜 岩, 高 峰*, 李 林*

(哈尔滨师范大学 物理与电子工程学院, 光电带隙材料教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 目前, 具有宽带-窄带双模探测模式的光电探测器在特殊应用中颇受欢迎, 传统具有双模探测模式的光电探测器是通过在宽带光电探测器中加入不同的滤光片来实现的。然而, 加装复杂的光学元件会增加光电探测器的制造成本和器件集成的复杂性。根据以上问题, 我们通过简单溶液热压法制备了MAPbCl₃/MAPbBr₃钙钛矿单晶异质结, 基于单晶异质结构筑了探测波段可调的光电探测器。当入射光由MAPbCl₃单晶侧入射时, 该器件仅对可见部分(400~600 nm)显示出高响应度(~0.05 A·W⁻¹)和高光谱抑制比(~55), 其上升时间和衰减时间分别为4.1 μs和620 μs。而当光从MAPbBr₃单晶侧入射时, 该器件对紫外-可见部分(300~600 nm)均有明显且连续的光响应。因此, 我们提出的溶液热压法和单晶异质结构为制备高性能探测波长可调谐的光电探测器提供了有效的解决方案。

关键词: 光电探测器; 钙钛矿; 单晶; 多波段探测

中图分类号: TN36 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20240007

Photodetector with Broadband-narrowband Dual-function Detection Mode

JIANG Yan, GAO Feng*, LI Lin*

(Key Laboratory for Photonic and Electronic Bandgap Materials, Ministry of Education,
School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150000, China)

* Corresponding Authors, E-mail: gaofeng@hrbnu.edu.cn; physics_lin@hotmail.com

Abstract: Currently, photodetectors with broadband-narrowband dual-mode detection modes are popular in special applications. Traditional photodetectors with dual-mode detection modes are achieved by adding different filters to the broadband photodetectors. However, complex optical components increase the manufacturing cost of photodetectors and the complexity of device integration. Based on the above problems, we prepared MAPbCl₃/MAPbBr₃ perovskite single crystal heterojunction through a simple solution hot pressing method, and built a photodetector with adjustable detection band based on the single crystal heterostructure. When the incident light is incident from the side of the MAPbCl₃ single crystal, the device shows high responsivity(~0.05 A·W⁻¹) and high spectral suppression ratio(~55) only to the visible part(400~600 nm), and its rise time and decay time are 4.1 μs and 620 μs. When the light is incident from the side of the MAPbBr₃ single crystal, the device has an obvious and continuous light response to the ultraviolet-visible part(300~600 nm). Therefore, our proposed solution hot pressing method and single-crystal heterostructure provide an effective solution for the preparation of high-performance photodetectors with tunable detection wavelengths.

Key words: photodetector; perovskite; single crystal; multi-band detection

收稿日期: 2024-01-06; 修订日期: 2024-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(62304063, 12074095); 黑龙江省自然科学基金(LH2023A011, JQ2022A002)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62304063, 12074095); Natural Science Foundation of Heilongjiang(LH2023A011, JQ2022A002)

1 引 言

光电探测器是将外部光信号转换为可操作的电信号的重要元器件,在机器视觉成像、生物传感和化学分析等领域发挥着不可或缺的作用^[1]。根据其响应频谱范围可分为宽带和窄带探测类型,宽带探测通常需要多种不同探测波长的探测器协同工作来实现宽光谱探测功能^[2-4]。而要实现特定波段的窄带光谱检测,必须将宽带光电探测器与不同透过率带通滤光片相配合,这无疑增加了器件的结构复杂性^[5-8]。为了解决器件结构复杂性的科学难题,人们提出了新的内部光学滤波概念,如电荷收集窄化(CCN)^[9-10]、激子扩散窄化^[11-12]、共振微腔^[13-14]、窄带材料吸收等^[15-16]。其中,利用CCN效应的实验思想来制备不同厚度的光学吸收层以改变电极对不同波段光生载流子的提取效率,最终使探测器表现出波长可协调的探测功能。Huang等在已获得的宽光谱探测器的玻璃衬底背面制备钙钛矿滤光层来吸收和消耗短波光光子,从而实现窄带光检测^[17-19]。Lan等设计了一种钙钛矿/聚合物混合光电探测器,利用钙钛矿层的高可见光吸收和近红外(NIR)透过作为可见光耗尽层、聚合物材料作为活性层获得了具有近红外探测功能的窄带探测器^[20-22]。

最近,由于有机-无机卤化物钙钛矿具有高的载流子迁移率、长的扩散长度、长的载流子寿命,引起了研究人员的关注^[23-24]。其中,多晶钙钛矿薄膜已被广泛应用于各种光电子器件,但它们仍然存在高密度的陷阱态和大量晶界等问题,从而限制了其进一步应用^[6,25-26]。与多晶薄膜相比,具有周期性结构的单晶钙钛矿因具有更高的结晶度、更少的缺陷、可忽略的晶界、可调谐的厚度和优异的稳定性而被公认为构建高性能的宽带-窄带光电探测器的首选材料^[27-29]。

在本工作中,我们利用溶液热压法高效制备了MAPbCl₃/MAPbBr₃钙钛矿单晶异质结,获得了具有波长可调谐的紫外-可见光电探测器。当入射光从宽带隙MAPbCl₃单晶侧入射时,MAPbCl₃作为滤光器屏蔽掉紫外光信号,该器件仅对可见范围表现出明显的光谱响应。在0.7 V偏压下,探测器在570 nm附近表现出0.05 A·W⁻¹的响应度和高的紫外-可见抑制比(~55)。当入射光从MAPbBr₃单晶侧入射时,该器件在测试的紫外-可

见范围内均表现出连续且明显的光谱响应。本工作仅需改变入射光的入射方向,探测器就可以实现窄带和宽带探测模式的快速切换,为制备高性能的波长可调谐探测器提供了一种新颖的设计思路。

2 实 验

2.1 样品制备

采用逆温结晶法获得高质量的MAPbX₃单晶。X为Cl时,钙钛矿在DMSO/DMF溶液(体积比为DMSO:DMF=1:1)中浓度控制在0.8 mol/L。X为Br时,钙钛矿在DMF中溶液浓度控制在1 mol/L。将获得的MAPbCl₃溶液从室温以5 °C/h的升温速率缓慢升到目标温度50 °C并一直保持,直至获得所需尺寸的MAPbCl₃单晶。同样,将制备的MAPbBr₃前体溶液从室温以5 °C/h的升温速率缓慢升到60 °C并一直保持,直至获得本工作所需的MAPbBr₃单晶。

为了制造MAPbCl₃和MAPbBr₃单晶异质结器件,通过在MAPbCl₃单晶表面滴下2 μL浓度为1 mol/L的MAPbBr₃溶液,并迅速将MAPbBr₃单晶置于MAPbCl₃单晶上,且在其上方施加100 Pa压强。以5 °C/h的升温速率缓慢升到60 °C维持24 h,最终获得所需的MAPbCl₃/MAPbBr₃钙钛矿单晶异质结。最后,利用真空热蒸发设备在MAPbBr₃单晶表面制作了厚度为50 nm的对称Au电极,得到了上层是MAPbBr₃单晶、下层是MAPbCl₃单晶的光电探测器。

2.2 样品表征

使用扫描电子显微镜(SEM,Hitachi SU70)表征单晶的表面形貌。利用X射线衍射仪(XRD,D/max-26001pc)表征样品的晶体结构。使用紫外-可见分光光度计(Lambda 850)和发光光谱(PL)来表征样品的光学特性。利用光谱响应测试系统(Zolix DR800-CUST)输出单色光和Keithley 6482源表来表征器件的*I-V*特性曲线和*I-t*曲线。通过光谱响应测试系统(Zolix DR800-CUST)表征器件的光谱响应特性。采用脉冲激光器和数字示波器表征器件的响应时间。

3 结果与讨论

3.1 材料表征

采用逆温结晶法制备了MAPbBr₃和MAPbCl₃单晶材料,其制备过程如图1(a)所示。为了制备

异质结,我们在MAPbCl₃单晶的(100)面上滴加浓度为1 mol/L的MAPbBr₃前驱体溶液,随后将MAPbBr₃单晶置于MAPbCl₃单晶上使它们的表面略有溶解,然后在外部压力下使这两个表面紧密接触。之后,将其放在电热板上在60 °C下维持24 h制备得到所需的MAPbCl₃/MAPbBr₃钙钛矿单晶异质结,其中MAPbCl₃单晶的厚度为1.6 mm,MAPbBr₃单晶的厚度为1 mm。图1(b)、(c)中的SEM图像分别显示了MAPbCl₃和MAPbBr₃单晶的表面,可以看出单晶材料表面光滑平坦,没有任何

晶界和孔洞。图1(d)中的SEM图像显示了MAPbCl₃/MAPbBr₃单晶异质结构的截面图,两种单晶紧密结合在一起没有任何间隙,并且界面处Cl元素和Br元素分布清晰,直接证明了单晶异质结的构成;在异质结界面处并没有发现较大区域的混相钙钛矿的出现,同时该器件的金属电极仅处在MAPbBr₃单晶侧,单晶厚度达到1 mm,距离混相区域较远,不影响光生载流子的分离和实现宽带-窄带探测的功能,这为获得波长可调谐探测器提供了良好的材料基础。

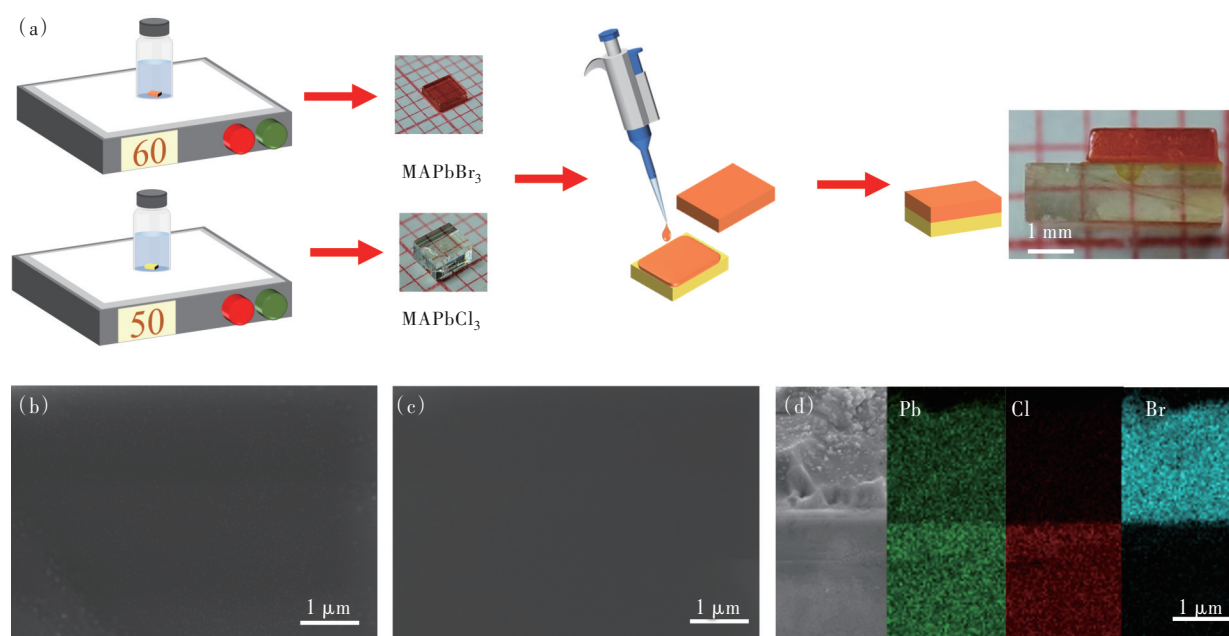


图1 (a)制备过程示意图;(b)MAPbCl₃单晶SEM图像;(c)MAPbBr₃单晶SEM图像;(d)MAPbBr₃/MAPbCl₃单晶异质结构的元素映射图像

Fig.1 (a)Schematic diagram of the preparation process. (b)SEM image of MAPbCl₃ single crystal. (c)SEM image of MAPbBr₃ single crystal. (d)Element mapping image of MAPbBr₃/MAPbCl₃ single crystal heterostructure

晶格匹配是验证单晶异质结形成的一个重要参数。两种晶体之间的晶格失配应小于15%,公式如下:

$$f = \frac{b - a}{a} \times 100\%, \quad (1)$$

其中 a 和 b 分别为MAPbCl₃单晶和MAPbBr₃单晶的晶格常数^[30]。计算得到MAPbBr₃和MAPbCl₃单晶之间的晶格失配为3.3%,这表明MAPbCl₃和MAPbBr₃单晶可以实现良好的异质结构^[31]。通过XRD对MAPbBr₃和MAPbCl₃单晶的结构特征进行评估(图2(a))。其中,MAPbBr₃和MAPbCl₃的(200)衍射峰的半峰宽(FWHM值)仅为0.14°和0.54°,这表明制备的单晶具有较高的结晶质量。图2(b)为MAPbCl₃和MAPbBr₃的光致发光光谱。

MAPbCl₃单晶和MAPbBr₃单晶的PL发光峰分别位于405 nm和550 nm处,这与其吸收边相对应。并且,MAPbCl₃单晶和MAPbBr₃单晶的PL峰的半峰宽分别为11 nm和20 nm,这进一步表明了MAPbCl₃单晶和MAPbBr₃单晶具有较高的结晶质量^[32-33]。图2(c)、(d)展示了所制备的MAPbCl₃单晶和MAPbBr₃单晶的紫外可见光吸收曲线。MAPbCl₃单晶在430 nm处具有锐利的吸收边,MAPbBr₃单晶在570 nm处具有锐利的吸收边。并且该吸收曲线未显示出任何明显的吸收拖尾现象,表明制备的单晶材料具有较低的陷阱态。MAPbCl₃和MAPbBr₃单晶的光致发光峰与吸收边位置相比发生蓝移是由于光载流子的非辐射复合率较低,显示出所制备的钙钛矿单晶具有较低的

陷阱密度^[34-36]。图 2(e)、(f)为 MAPbCl₃单晶和 MAPbBr₃单晶对应的光学带隙图,由以下公式可得:

$$(\alpha h\nu)^2 \propto (h\nu - E_g), \quad (2)$$

其中, α 为吸光系数, h 为普朗克常数, ν 为入射光子频率, E_g 为禁带宽度。经计算可得到 MAPbCl₃单晶和 MAPbBr₃单晶的带隙分别为 2.88 eV 和 2.17 eV。

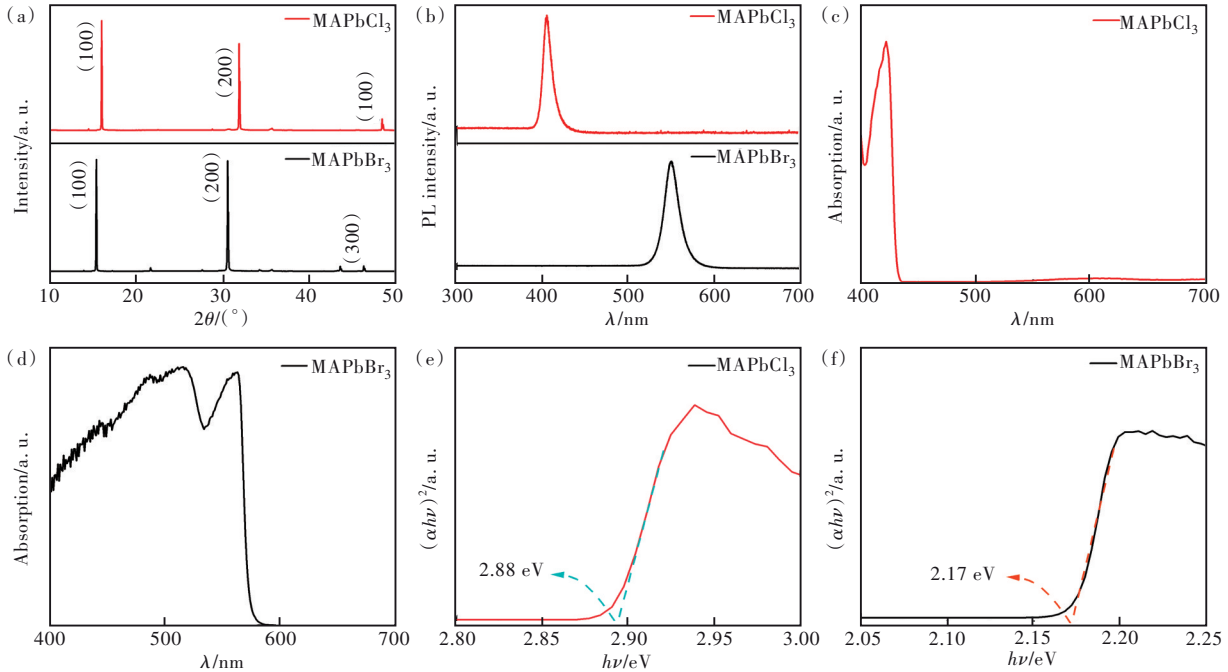


图 2 (a) MAPbCl₃和 MAPbBr₃单晶的 XRD 谱;(b) MAPbCl₃和 MAPbBr₃单晶的光致发光谱(PL);(c)~(f) MAPbCl₃和 MAPbBr₃单晶的吸收光谱和光学带隙谱

Fig.2 (a) MAPbCl₃ and MAPbBr₃ single crystal XRD patterns. (b) MAPbCl₃ and MAPbBr₃ single crystal photoluminescence patterns (PL). (c)~(f) MAPbCl₃ and MAPbBr₃ single crystal absorption spectra and optical band gap

3.2 光电探测器制备及其性能表征

为了探究 MAPbCl₃/MAPbBr₃钙钛矿单晶异质结器件的性能特征,先对器件进行 I - V 测试。为了方便讨论,选用 380 nm ($0.52 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 作为紫外波段的特征波长,570 nm ($0.15 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 作为可见波段的特征波长。当入射光从 MAPbBr₃单晶侧入射时,可以观察到该器件分别受到 380 nm 和 570 nm 的光照时均有明显的光电流产生(图 3(a))。当光从 MAPbCl₃单晶侧入射时,该器件仅在 570 nm 的光照下产生光电流信号,对 380 nm 几乎没有光响应(图 3(b))。在 380 nm 和 570 nm 光照下探测器的光暗电流比分别为 1.2 和 1.5;从 MAPbCl₃单晶侧入射时,在 380 nm 和 570 nm 光照下的光暗电流比分别为 1 和 1.3。随着入射光方向的改变,探测器在 380 nm 光照条件下的光暗电流比发生了明显的变化。这直接证明了本文所制备的 MAPbCl₃/MAPbBr₃钙钛矿单晶异质结光电探测器在仅改变入射光方向的条件下就能表现出探测波长可调谐的特征。响应度是评估探测器性能最基

本、最重要的物理参数,可由以下公式得出^[37]:

$$R = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{P}, \quad (3)$$

其中 I_{light} 代表光电流, I_{dark} 代表器件暗电流, P 代表入射光功率。

图 3(c)~(d) 为该器件的光谱响应度曲线。当入射光从顶部 MAPbBr₃单晶侧照射时,该器件在 300~600 nm 的测试范围内表现出宽光谱的响应特征,在 0.7 V 偏压下在响应度峰值位于 560 nm 波长处达到 $0.1 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。这种从顶部照射获得的宽光谱响应是由于在入射光的作用下产生的光生载流子在外置电场的帮助下被电极提取,表现出与 MAPbBr₃单晶材料吸收特征相类似的光谱响应度。当入射光从底部照射时(MAPbCl₃单晶侧),该器件仅对 400~580 nm 的可见光范围有明显的光谱响应。同样在 0.7 V 偏压下,响应度峰值位于 560 nm 波长处达到 $0.05 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。这种从底部照射表现出的窄带探测特征是由于底部 MAPbCl₃单晶吸收紫外波段的入射光,导致紫外

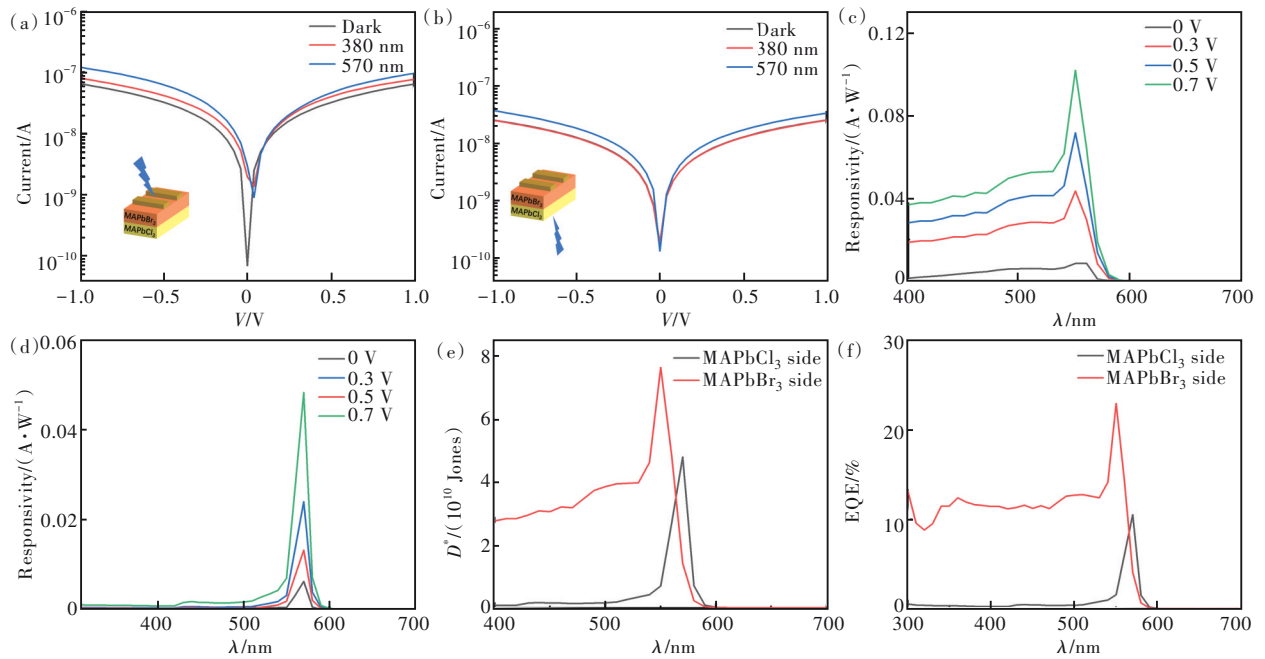


图3 (a)MAPbCl₃/MAPbBr₃单晶异质结的*I-V*特性曲线(光由MAPbBr₃单晶侧入射);(b)MAPbCl₃/MAPbBr₃单晶异质结的*I-V*特性曲线(光由MAPbCl₃单晶侧入射);(c)光从MAPbBr₃单晶侧入射时的光响应曲线;(d)光从MAPbCl₃单晶侧入射时的光响应曲线;(e)~(f)MAPbCl₃/MAPbBr₃单晶异质结在0.7 V偏压下的探测率和外量子效率

Fig.3 (a) *I-V* characteristic curves of MAPbCl₃/MAPbBr₃ single crystal heterojunction (light is incident laterally by MAPbBr₃ single crystal). (b) *I-V* characteristic curves of MAPbCl₃/MAPbBr₃ single crystal heterojunction (light is incident laterally by MAPbCl₃ single crystal). (c) Photoresponse curves when light is incident from the side of MAPbBr₃ single crystal. (d) Photoresponse curves when light is incident from the side of MAPbCl₃ single crystal. (e) - (f) Detectivity and external quantum efficiency of MAPbCl₃/MAPbBr₃ single crystal heterojunction at 0.7 V bias voltage

光无法到达上层MAPbBr₃单晶,而可见光信号未被滤光层吸收可激发上层的MAPbBr₃单晶产生光生载流子并被电极提取。此外,该器件在窄带探测模式中,400~550 nm波长的光谱响应度比峰值响应度低得多。这是因为,根据比尔-朗伯定律,入射光的强度随着基底中的穿透深度呈指数下降,短波长产生的光生载流子穿透深度低,产生的光生载流子无法有效地在外置电场作用下被电极提取,大多都在材料内部复合掉。长波光子的入射深度较深,在电极附近产生光生载流子可以轻松地被电极提取。因此,该器件400~550 nm波长的光谱响应度较低。探测率(D^*)是评估探测器对弱光检测性能的重要参数,其计算公式如下:

$$D^* = \frac{R\sqrt{S}}{\sqrt{2qI_{\text{dark}}}}, \quad (4)$$

其中 R 为光电探测器的响应度, S 为器件有效面积, I_{dark} 为暗电流, q 为电荷电量。图3(e)为异质结器件随波长变化的探测率曲线。经计算可得两

种探测模式的峰值探测率分别为 7.6×10^{10} Jones (MAPbBr₃侧入射,550 nm)和 4.8×10^{10} Jones (MAPbCl₃侧入射,570 nm),表明异质结光电探测器对弱光具有较强的检测能力。外量子效率(EQE) η_{EQE} 也是评估探测器性能的重要参数,EQE的计算公式为^[38]:

$$\eta_{\text{EQE}} = R \frac{hc}{\lambda q}, \quad (5)$$

其中, R 代表响应度, h 代表普朗克常数, c 代表真空下的光速, λ 代表入射光波长, q 代表电子电荷。图3(f)为异质结探测器的EQE曲线。当入射光从MAPbBr₃侧入射时,在550 nm处的峰值EQE为22%;当入射光从MAPbCl₃侧入射时,570 nm处的峰值EQE为10%。将本文所制备的MAPbCl₃/MAPbBr₃钙钛矿单晶异质结光电探测器性能参数与此前报道的其他的MAPbCl₃或MAPbBr₃单晶型光电探测器性能参数进行比较,汇总数据如表1所示^[23,26-27,31,39]。从表中可以看出,本文所制备的MAPbCl₃/MAPbBr₃钙钛矿单晶异质结具有优异的光电性能。

表 1 钙钛矿单晶光电探测器性能参数比较

Tab. 1 Comparison of performance parameters of perovskite single crystal photodetectors

材料	响应度/(A·W ⁻¹)	外量子效率/%	探测率/Jones	参考文献
MAPbBr ₃	0.004	—	1.5×10 ¹⁰	[23]
MAPbCl ₃	0.046	—	1.2×10 ¹⁰	[26]
MAPbBr _{3-x} Cl _x	—	1.6	2×10 ¹⁰	[27]
MAPbCl ₃ /MAPbBr ₃	0.026	8	—	[31]
MAPbCl ₃ /MAPbBr ₃	0.085	—	7×10 ¹¹	[39]
MAPbCl ₃ /MAPbBr ₃	0.1	22	7.6×10 ¹⁰	本文

在 1 V 偏压下,器件在 380 nm 和 570 nm 波长单色光照射下的时间相关的电流曲线 ($I-t$) 如图

4(a)、(b)所示。入射的光信号为脉冲信号,每 10 s 开关一次。当 380 nm 和 570 nm 单色光从顶部

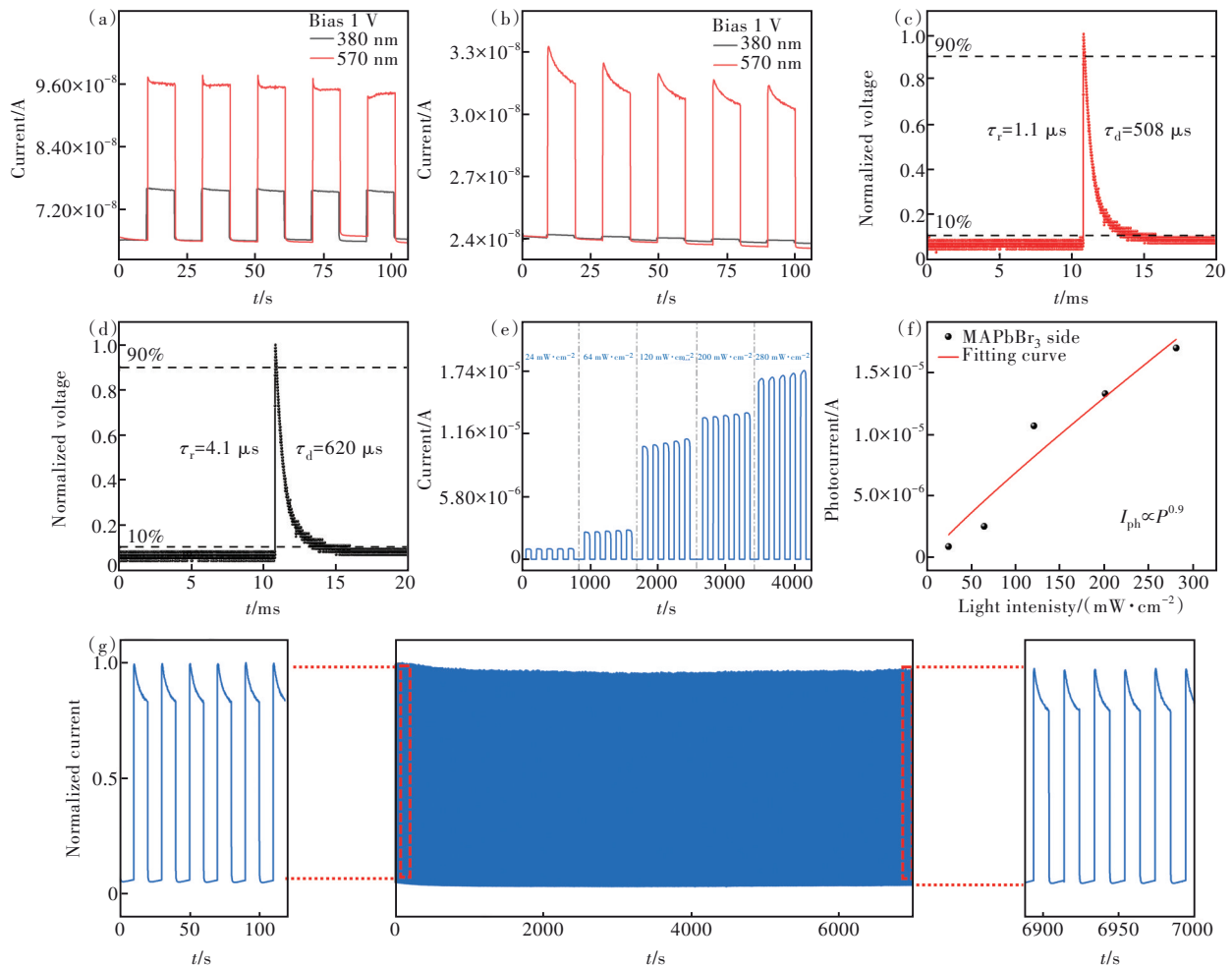


图 4 (a)MAPbCl₃/MAPbBr₃单晶异质结的 $I-t$ 特性曲线(光由 MAPbBr₃ 单晶侧入射);(b)MAPbCl₃/MAPbBr₃单晶异质结的 $I-t$ 特性曲线(光由 MAPbCl₃ 单晶侧入射);(c)光从顶部 MAPbBr₃ 单晶侧入射时的瞬态光响应;(d)光从底部 MAPb-Cl₃ 单晶侧入射时的瞬态光响应;(e)不同光功率下从 MAPbBr₃ 单晶侧入射时的 $I-t$ 特性曲线;(f)1 V 下光电流对光强的依赖曲线;(g)光电探测器在 1 V 下的长期稳定性测试

Fig.4 (a) $I-t$ characteristic curves of MAPbCl₃/MAPbBr₃ single crystal heterojunction (light is incident laterally by MAPbBr₃ single crystal). (b) $I-t$ characteristic curves of MAPbCl₃/MAPbBr₃ single crystal heterojunction (light is incident laterally by MAPbCl₃ single crystal). (c) Transient photoresponse when light is incident from the top of MAPbBr₃ single crystal. (d) Transient photoresponse when light is incident from the side of the bottom MAPbCl₃ single crystal. (e) $I-t$ characteristic curve when incident from the side of MAPbBr₃ single crystal under different optical powers. (f) Dependence curve of photocurrent on light intensity at 1 V. (g) Long-term stability test of photodetector at 1 V

MAPbBr₃单晶入射时,光电探测器可以与入射的光信号同频产生周期性变化的电流,表明该器件具有较好的重现性和稳定性。但当光从底部MAPbCl₃单晶入射时,仅对570 nm的光产生明显的周期性变化电流,对380 nm的光没有产生明显的光电流,表明该器件在改变入射光的方向时可以实现宽带-窄带双功能探测模式。响应时间是评价探测器性能的另一个重要参数,它体现了对快速变化的光信号的捕获能力。采用脉冲宽度为5 ns的波长可调脉冲激光器为激发源,并利用示波器记录瞬态光电压。图4(c)、(d)显示了光电探测器在顶部和底部用波长为355 nm的脉冲激光(激光能量为1.2 mJ,脉冲宽度为5 ns)照射下的单周期光响应。通常认为光信号从最大值的10%上升到90%所需要的时间为上升时间,从最大值90%下降到10%所需要的时间为下降时间。当脉冲激光从MAPbBr₃单晶侧照射时,上升时间和下降时间确定为1.1 μs和508 μs。当脉冲激光从MAPbCl₃单晶侧照射时,上升时间和下降时间确定为4.1 μs和620 μs。光电探测器的超快响应时间表明,在窄带和宽带范围内工作的光电探测器有可能用于跟踪快速光信号。为了进一步研究光响应特性,选用405 nm波长的光作为光源,并从MAPbBr₃单晶侧入射,通过收集不同光照强度所激发的光电流数据得到了如图4(e)所示的*I-t*曲线。探测器的光电流表现出随入射光强度增大而不断增加的趋势。图4(f)中显示了光电流与光强的函数关系,可用下面的函数来描述:

$$I_{ph} \propto P^\alpha, \quad (6)$$

其中 I_{ph} 是光电流, P 是光强度, α 为入射光功率与光电流之间具体的指数关系。通过对测量数据进

行拟合,在1 V偏置下的 α 系数为0.9,证明器件在测试范围内表现出良好的线性动态响应特征。为了证明单晶异质结光电探测器的工作稳定性,测试了该器件在空气中(温度:20 °C,湿度:10%~30%)连续工作350个循环的*I-t*曲线(图4(g))。通过比较前5个循环和最后5个循环的光电流和暗电流,发现光电流的衰减可忽略不计,证明了异质结光电探测器具有良好的空气环境稳定性。

4 结 论

本文采用逆温结晶法生长了两种钙钛矿单晶,利用溶液热压法合成MAPbCl₃/MAPbBr₃单晶异质结,基于异质结制备了宽带/窄带双功能光电探测器。当光从MAPbBr₃单晶侧入射时,该器件对紫外-可见部分(300~600 nm)均有明显且连续的光响应,在550 nm达到峰值响应度0.1 A·W⁻¹。但当入射光从MAPbCl₃单晶侧入射时,该器件仅对可见部分(400~600 nm)显示出高响应度(~0.05 A·W⁻¹)和高光谱抑制比(~55),其上升时间和衰减时间为4.1 μs和620 μs,在570 nm达到峰值响应度0.05 A·W⁻¹。光从任意侧入射时,光电探测器均具有优异的响应速度。其中,光从MAPbCl₃单晶侧入射时,上升时间和衰减时间分别为1.1 μs和508 μs。因此,本工作提供了一种快速溶液热压法制备高质量钙钛矿单晶异质结的方法,并为实现高性能的宽带-窄带光电探测器提供了一种思路。

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.20240007>.

参 考 文 献:

- [1] ARMIN A, JANSEN-VAN VUUREN R D, KOPIDAKIS N, *et al.* Narrowband light detection via internal quantum efficiency manipulation of organic photodiodes [J]. *Nat. Commun.*, 2015, 6(1): 6343.
- [2] CHEN J W, LI L, GONG P L, *et al.* A submicrosecond-response ultraviolet-visible-near-infrared broadband photodetector based on 2D tellurosilicate InSiTe₃ [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(5): 7745-7754.
- [3] DANDIN M, ABSHIRE P, SMELA E. Optical filtering technologies for integrated fluorescence sensors [J]. *Lab Chip*, 2007, 7(8): 955-977.
- [4] WANG D H, LIU X, KANG Y, *et al.* Bidirectional photocurrent in p-n heterojunction nanowires [J]. *Nat. Electron.*, 2021, 4(9): 645-652.
- [5] FAKHARUDDIN A, GANGISHETTY M K, ABDI-JALEBI M, *et al.* Perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Electron.*, 2022, 5(4): 203-216.
- [6] FANG Y J, DONG Q F, SHAO Y C, *et al.* Highly narrowband perovskite single-crystal photodetectors enabled by

- surface-charge recombination [J]. *Nat. Photonics*, 2015, 9(10): 679-686.
- [7] ZHAO J D, WANG X, XU Y B, *et al.* Electrically modulated near-infrared/visible light dual-mode perovskite photodetectors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(22): 25824-25833.
- [8] GUI P B, SUN Y M, YANG L P, *et al.* Surface microstructure engineering in MAPbBr₃ microsheets for performance-enhanced photodetectors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(51): 59955-59963.
- [9] WANG J, XIAO S, QIAN W, *et al.* Self-driven perovskite narrowband photodetectors with tunable spectral responses [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(3): 2005557.
- [10] TSAI W L, CHEN C Y, WEN Y T, *et al.* Band tunable microcavity perovskite artificial human photoreceptors [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(24): 1900231.
- [11] XIA K, LI Y C, WANG Y, *et al.* Narrowband-absorption-type organic photodetectors for the far-red range based on fullerene-free bulk heterojunctions [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(8): 1902056.
- [12] SU X J, HOU X H, ZHANG Q L, *et al.* 3D-heterojunction based on embedded perovskite micro-sized single crystals for fast photomultiplier photodetectors with broad/narrowband dual-mode [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(40): 2303964.
- [13] LEI L, DONG Q, GUNDOGDU K, *et al.* Metal halide perovskites for laser applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(16): 2010144.
- [14] OUYANG B S, WANG Y H, ZHANG R Y, *et al.* Dual-polarity output response-based photoelectric devices [J]. *Cell Rep. Phys. Sci.*, 2021, 2(5): 100418.
- [15] LI L L, DENG Y H, BAO C X, *et al.* Self-filtered narrowband perovskite photodetectors with ultrafast and tuned spectral response [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(22): 1700672.
- [16] KIM W, KIM H, YOO T J, *et al.* Perovskite multifunctional logic gates *via* bipolar photoresponse of single photodetector [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 720.
- [17] LIU Z X, TAO L T, ZHANG Y Z, *et al.* Narrowband near-infrared photodetector enabled by dual functional internal-filter-induced selective charge collection [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(15): 2100288.
- [18] KUBLITSKI J, FISCHER A, XING S, *et al.* Enhancing sub-bandgap external quantum efficiency by photomultiplication for narrowband organic near-infrared photodetectors [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 4259.
- [19] OUYANG B S, ZHAO H Q, WANG Z L, *et al.* Dual-polarity response in self-powered ZnO NWs/Sb₂Se₃ film heterojunction photodetector array for optical communication [J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104312.
- [20] PAN Y Z, WANG X, XU Y B, *et al.* Epitaxy growth of MAPbBr_xCl_{3-x} single-crystalline perovskite films toward spectral selective detection in both broadband and narrowband ranges [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(40): 13763-13773.
- [21] AUGUSTINE P, SINGH D K, KUMAWAT K L, *et al.* Dual-polarity switching in self-powered Ag/MoS₂/Ag photodetectors [J]. *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2023, 1(8): 1396-1404.
- [22] SAIDAMINOV M I, HAQUE M A, SAVOIE M, *et al.* Perovskite photodetectors operating in both narrowband and broadband regimes [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(37): 8144-8149.
- [23] JUNG H R, CHO Y, JO W. UV and visible photodetectors of MAPbBr₃ and MAPbCl₃ perovskite single crystals *via* single photocarrier transport design [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(7): 2102175.
- [24] PAN Y Z, WANG X, ZHAO J D, *et al.* Photodiodes based on a MAPbBr₃/Bi³⁺-doped MAPbCl₃ single crystals heterojunction for the X-ray detection [J]. *CrystEngComm*, 2021, 23(28): 4954-4962.
- [25] CHENG X H, JING L, ZHAO Y, *et al.* Crystal orientation-dependent optoelectronic properties of MAPbCl₃ single crystals [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(6): 1579-1586.
- [26] MACULAN G, SHEIKH A D, ABDELHADY A L, *et al.* CH₃NH₃PbCl₃ single crystals: inverse temperature crystallization and visible-blind UV-photodetector [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2015, 6(19): 3781-3786.
- [27] WEI K H, CHEN B J, ZHANG L B, *et al.* Investigation on multiphoton absorption in MAPbBr₃ and MAPbCl₃ single-crystals under excitation wavelength up to mid-infrared [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2022, 19(5): 056003.
- [28] XU Y B, WANG X, LIU S L, *et al.* Sensitive thermography *via* sensing visible photons detected from the manipulation of the trap state in MAPbX₃ [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(48): 56526-56536.
- [29] XU J Y, MA J, GU Y K, *et al.* Progress of metal halide perovskite crystals from a crystal growth point of view [J]. *Cryst. Res. Technol.*, 2023, 58(1): 2200128.
- [30] LEI Y S, CHEN Y M, ZHANG R Q, *et al.* A fabrication process for flexible single-crystal perovskite devices [J].

- Nature*, 2020, 583(7818): 790-795.
- [31] YAN J, GAO F, TIAN Y Z, *et al.* Controllable perovskite single crystal heterojunction for stable self-powered photo-imaging and X-ray detection [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(17): 2200449.
- [32] HSU H P, LI L C, SHELLAIAH M, *et al.* Structural, photophysical, and electronic properties of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ single crystals [J]. *Sci. Rep.*, 2019, 9(1): 13311.
- [33] FERNANDEZ-GUILLEN I, CHIRVONY V S, KREČMAROVÁ M, *et al.* Boosting photoluminescence in MAPbBr_3 single crystals through laser-based surface modification [J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(12): 4151-4159.
- [34] SHAO Y C, XIAO Z G, BI C, *et al.* Origin and elimination of photocurrent hysteresis by fullerene passivation in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ planar heterojunction solar cells [J]. *Nat. Commun.*, 2014, 5(1): 5784.
- [35] LIU Y C, YANG Z, CUI D, *et al.* Two-inch-sized perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) crystals: growth and characterization [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(35): 5176-5183.
- [36] LIU Y C, SUN J K, YANG Z, *et al.* 20-mm-large single-crystalline formamidinium-perovskite wafer for mass production of integrated photodetectors [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2016, 4(11): 1829-1837.
- [37] 叶昊熙, 苏嘉韵, 钟日健, 等. 基于 $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ 铁电薄膜的高性能自驱动紫外光电探测器 [J]. *发光学报*, 2023, 44(4): 685-693.
YE H X, SU J Y, ZHONG R J, *et al.* High-performance self-powered ultraviolet photodetectors based on ferroelectric $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ thin films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(4): 685-693. (in Chinese)
- [38] 段雨晗, 蒋大勇, 赵曼. 高增益 ZnO 肖特基紫外光电探测器光响应特性 [J]. *发光学报*, 2023, 44(10): 1816-1823.
DUAN Y H, JIANG D Y, ZHAO M. Responsivity characteristics of ZnO Schottky ultraviolet photodetectors with high gain [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(10): 1816-1823. (in Chinese)
- [39] LIU C, CHEN H, LIN P, *et al.* Optimized photoelectric characteristics of MAPbCl_3 and MAPbBr_3 composite perovskite single crystal heterojunction photodetector [J]. *J. Phys. Condens. Matter*, 2022, 34(40): 405703.



姜岩(1997-),男,黑龙江绥化人,硕士研究生,2019年于安阳工学院获得学士学位,主要从事钙钛矿材料制备及其性能的研究。

E-mail: jiangyanhrb2022@163.com



李林(1980-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电探测器、低成本太阳能电池等领域的研究。

E-mail: physics_lin@hotmail.com



高峰(1992-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,2022年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事半导体材料制备及其光电探测性能的研究。

E-mail: gaofeng@hrbnu.edu.cn