

文章编号: 1000-7032(2026)04-0680-12

基于Sb₂S₃单晶/n-GaAs异质结的宽带自驱动光电探测器

周祥博¹, 张发政², 朱 骞², 申 浩², 覃名文²,
田子龙², 党甜甜², 万 鹏^{2*}

(1. 安徽财经大学 计算机与信息工程学院, 安徽 蚌埠 233030;

2. 南京航空航天大学 物理学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 宽带光电探测器在成像、通信与光谱分析等领域具有重要的应用价值。本文采用化学气相沉积法制备了高结晶质量的微米级Sb₂S₃单晶,其缺陷密度仅为 $4.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。通过SCAPS-1D软件建立了Sb₂S₃/GaAs异质结模型,仿真结果表明,降低Sb₂S₃缺陷密度有助于提升异质结的输出电流与光谱响应度,尤其在紫外和可见光波段。在此基础上,构建了基于Sb₂S₃单晶/n-GaAs异质结的自驱动光电探测器,该器件在300~1 000 nm宽光谱范围内表现出优异的光电响应性能。在 $0.4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 光功率密度下,830 nm处响应度最高,达到 $200 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$,比探测率超过 3×10^{10} Jones, -3 dB带宽高于1 kHz,上升/下降响应时间分别为134 μs 与223 μs 。本研究为高性能、宽光谱、低功耗光电探测器的设计与制备提供了可行路径,在集成光电子与传感领域展现出良好应用潜力。

关键词: Sb₂S₃单晶; 光电探测器; SCAPS-1D; 宽带

中图分类号: TL814

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250281

CSTR: 32170. 14. CJL. 20250281

Self-powered Broadband Photodetector Based on Sb₂S₃ Single Crystal/ n-GaAs Heterojunction

ZHOU Xiangbo¹, ZHANG Fazheng², ZHU Qian², SHEN Hao², QIN Mingwen²,
TIAN Zilong², DANG Tiantian², WAN Peng^{2*}

(1. School of Computer and Information Engineering, Anhui University of Finance & Economics, Bengbu 233030, China;

2. College of Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

* Corresponding Author, E-mail: pengwan919@nuaa.edu.cn

Abstract: Broadband photodetectors are of significant application value in fields such as imaging, communication, and spectral analysis. In this work, high-crystalline-quality micrometer-sized Sb₂S₃ single crystals were prepared by chemical vapor deposition, exhibiting a low defect density of only $4.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. An Sb₂S₃/GaAs heterojunction model was established using SCAPS-1D software, and simulations indicated that the low defect density in Sb₂S₃ contributes to enhancing the output current and spectral responsivity of the heterojunction, particularly in the ultraviolet and visible wavelength ranges. Based on this, a self-powered heterojunction photodetector based on Sb₂S₃ single crystal/n-GaAs was fabricated. The device demonstrates excellent photoelectrical response across a broad spectral range from 300 nm to 1 000 nm. Under an optical power density of $0.4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, it achieves a peak responsivity of over $200 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ at 830 nm, a specific detectivity exceeding 3×10^{10} Jones, a -3 dB bandwidth higher than 1 kHz, and rise/fall response times of 134 μs and 223 μs , respectively. This study provides a feasible approach for the design and fabrication of high-performance, broadband, low-power photodetectors, showing promising potential for applications in

收稿日期: 2025-12-17; 修订日期: 2026-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(62404101); 安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类)重点项目(2023AH050266); 安徽财经大学校级一般研究项目(ACKYC23056)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62404101); Key Project of Scientific Research in Natural Sciences for Higher Education Institutions in Anhui Province (2023AH050266); General Research Project of Anhui University of Finance and Economics (ACKYC23056)

integrated optoelectronics and sensing systems.

Keywords: Sb₂S₃ single crystal; photodetector; SCAPS-1D; broadband

1 引言

宽带光电探测器是光谱分析、环境监测、成像系统及高速光通信等领域的核心器件,其性能直接决定整个系统的探测灵敏度与信息获取能力^[1-3]。目前,大多数宽带探测器依赖于硅、钢镓砷等传统半导体材料,或借助异质集成、多波段设计等复杂结构以拓宽响应光谱^[4-5]。然而,这类器件通常需施加外部偏压工作,导致系统功耗与结构复杂度增加^[6]。自驱动光电探测器无需外接电源即可实现光电检测,具有光暗比高、灵敏度优、重量轻、体积小以及能耗低等突出优势^[7-8]。这些特性使得自驱动光电探测器在军事、远程探测及医疗可穿戴设备中具有应用前景。基于光伏效应、光热电效应和铁电光伏效应等机制均可实现自驱动探测^[9]。其中,基于光伏效应的自驱动光电探测器,通过异质结界面处内置电场驱动光生载流子的分离与输运,无需外偏压即可工作^[10]。更重要的是,通过光伏效应可以结合各种带隙的材料形成宽波段探测器^[11]。例如,最近,Xiao等构建了石墨烯/WSe₂/SnSe₂ III型异质结,并结合非对称接触设计,实现了响应度达258.5 mA·W⁻¹、光开关比4.6×10⁴的自驱动宽带光电探测器^[12]。

近年来,V-VI族半导体Sb₂S₃因其独特的物化性质而备受关注,其带隙可在1.5~2.2 eV范围内灵活调控。Sb₂S₃具备高达10⁵ cm⁻¹的强吸光系数和合适的载流子迁移率(1~10 cm²·V⁻¹·s⁻¹),并且在空气中展现出良好的稳定性^[13]。这些优势使其在光伏领域进展显著,基于Sb₂S₃多晶薄膜的太阳能电池效率已超过8%,这为其在宽带光电探测领域的应用提供了扎实的性能基础^[14-15]。最近,关于Sb₂S₃薄膜和纳米结构的宽带光电探测器也逐渐被研究^[16-18]。例如,Li等通过构建Sb₂S₃/TiO₂异质结并优化退火温度,实现了紫外-可见-近红外宽光谱自驱动探测。在650 nm光照下,器件获得了0.7 A·W⁻¹的响应度与7.4×10¹² Jones的比探测率,并展现出在生物传感等领域的应用前景^[19]。然而,目前已报道的Sb₂S₃基探测器虽具有高灵敏度与高探测率,但普遍存在响应速度较慢的问题,其主要原因在于多晶或纳米材料中存在较高的缺

陷密度与丰富的表面态^[20]。载流子在陷阱态中的缓慢捕获与释放过程严重制约了器件性能^[21-22]。因此,通过材料生长优化与能带工程构筑高质量Sb₂S₃基异质结,成为实现高性能、快响应速度宽带探测器的关键途径。

本文采用化学气相沉积法成功制备出缺陷密度低、高结晶质量的Sb₂S₃微米单晶,并将其与n型GaAs衬底相结合,构建出ITO/Sb₂S₃单晶/n-GaAs/Cr/Au异质结自驱动光电探测器。通过仿真模拟和光电表征测试,揭示了该器件在300~1 000 nm宽光谱范围内的优异光电响应行为,即器件表现出高响应度与比探测率、快响应速度和良好工作稳定性等综合性能。该工作为发展下一代高性能、低功耗宽带光电探测器提供了材料与结构基础。

2 实验

2.1 样品和器件制备

通过化学气相沉积(CVD)法生长Sb₂S₃单晶已有相关报道^[17,23]。本工作中,我们通过优化沉积温度、载气流速及生长时间等关键参数,成功制备出了具有高结晶质量、低缺陷密度且尺寸均匀的微米级Sb₂S₃单晶。具体步骤如下:将前驱体Sb粉末(纯度99.99%)放入刚玉舟中,舟上覆盖一小片Si衬底,然后置于炉体中心区域;另取S粉末(纯度99.99%)放入另一只刚玉舟,置于Sb粉末的上游位置。S粉末与Sb粉末的化学计量比为3:2,两前驱体间距约6 cm。反应过程中,生长温度维持在580 °C,采用120 mL·min⁻¹的氩气(Ar)作为保护气与载气。生长结束后,管式炉自然冷却,最终在Si衬底上合成出Sb₂S₃单晶。

挑选具有高结晶质量的单根Sb₂S₃微米单晶并转移至石英衬底上,将其两端浸入钢镓锡(In-GaSn)液态电极中30 min,从而制备出单根Sb₂S₃单晶金属-半导体-金属(MSM)器件。其中,In-GaSn液态电极具有低熔点与良好润湿性,易于实现与Sb₂S₃单晶的低损伤欧姆接触。进一步制备了垂直结构的Sb₂S₃单晶/n-GaAs异质结光电探测器。衬底选择(100)晶向的n型GaAs单面抛光片,掺杂浓度为1×10¹⁷ cm⁻³,衬底表面均方根粗糙

度小于 1 nm。具体步骤如下:首先, n-GaAs 衬底表面经丙酮、乙醇超声清洗, 用去离子水进行多次冲洗, 并经氮气吹干。通过电子束蒸发在 n-GaAs 衬底上沉积 Cr/Au(30/100 nm) 电极, 随后在管式炉中 400 °C 下退火 1 h。接着, 选取高结晶质量的 Sb_2S_3 单晶水平放置在 GaAs 衬底上, 并在 GaAs 衬底两侧放置聚二甲基硅氧烷(PDMS)。然后, 将一面带有 Ni/Au 电极的氧化铟锡(ITO)导电玻璃反向置于顶部, 使其导电层与 Sb_2S_3 单晶紧密接触, 形成基于垂直结构的 Sb_2S_3 单晶/n-GaAs 异质结光电探测器。材料的接触方式主要依赖于表面之间的物理贴合和微弱范德华作用, 未进行额外的表面处理或退火工艺。PDMS 具有优异绝缘特性, 其核心作用是物理隔离顶部的 ITO 电极与底部的 GaAs 衬底的边缘部分。PDMS 还具有适度的柔韧性和粘附性, 能为上方的 ITO 玻璃提供均匀的机械支撑, 缓冲操作应力, 并减少外界环境(如湿度、灰尘)对敏感异质结界面区域的直接侵扰。

2.2 样品和器件表征

使用光学显微镜和扫描电子显微镜(SEM)对 Sb_2S_3 单晶的形貌进行表征。采用能量色散 X 射线光谱仪(EDX)分析 Sb_2S_3 单晶的元素分布。使用 X 射线衍射仪(XRD)对相同生长条件下制备、并富集于衬底上的大量 Sb_2S_3 微米晶体进行物相分析。样品的拉曼光谱由配有 532 nm 激光器的微区拉曼光谱仪(Metatest, MStarter 100)获取。电流-电压(I - V)特性、电流-时间(I - T)特性以及响应时间均采用扫描光电测试系统(Metatest, MStarter 200)完成, 其中光功率使用功率计进行校准。

3 仿 真

采用 SCAPS-1D 仿真软件对 ITO/ Sb_2S_3 /n-GaAs/Au 异质结器件的光电特性进行模拟, 该软件的核心计算原理建立在包括泊松方程、电子和空穴连续性方程在内的多个半导体物理方程之上^[24]。在软件中, 根据实际的垂直器件结构建立了模型。为了简化模拟过程, 电极与半导体均采用欧姆接触。 Sb_2S_3 和 GaAs 材料的仿真参数见参考文献^[25-26], 其中 Sb_2S_3 为 p 型, 非故意掺杂浓度设置为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, GaAs 为 n 型, 掺杂浓度设置为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。模拟过程中, 入射光从 ITO 侧入射。该模型能够计算暗场状态下的能带结构和 I - V 曲线, 以及光照条件下的光谱响应度、短路电流密度和能带结

构等参数。为了使模拟结果更符合实际情况, 对 Sb_2S_3 的体缺陷密度等参数进行了调整。

4 结果与讨论

图 1 展示了采用 CVD 法所制备的 Sb_2S_3 单晶的形貌与结构表征结果。图 1(a) 为 Sb_2S_3 单晶的 CVD 生长过程示意图。该方法的核心过程是: 分别加热固态的 Sb 和 S 粉末, 使其升华并形成气态前驱体; 在惰性载气的输运下, 这些前驱体被输送至沉积区, 并在预定温度的基底表面发生气相-固相化学反应, 最终生长出高质量的 Sb_2S_3 单晶, 具体工艺参数详见实验部分。光学显微照片(补充文件图 S1)表明, 所得晶体尺寸均匀, 处于数十至数百微米量级, 且呈现出规整的几何轮廓。对样品进行 XRD 分析, 其结果如图 1(b) 所示, 所有衍射峰均与正交晶系 Sb_2S_3 的标准谱(PDF#42-1393)精确吻合, 且未检测到任何杂质的衍射信号, 充分证实了所合成材料的高纯度与良好的结晶性^[27]。进一步的 SEM 观察结果(图 1(c))显示, 晶体表面光滑平整、微观结构致密均匀, 无明显的孔洞或裂纹, 这有利于其在光电器件中充当高效的有源层。EDX 面扫描分析显示, Sb_2S_3 单晶中 Sb 和 S 元素分布均匀, 其原子百分比为 42.16%:57.84%, 该比值接近 Sb_2S_3 的化学计量比^[28]。此外, 图 1(d) 的拉曼光谱在特征波数位置出现了数个尖锐且强度显著的振动峰, 这些峰位与文献中已报道的 Sb_2S_3 拉曼指纹特征一致^[29], 进一步验证了其晶体结构。如图 1(e) 所示, 可观察到 Sb_2S_3 单晶在 730 nm 波长附近出现显著的吸收边, 表明该区域存在强烈的光吸收衰减, 由此估算其光学带隙约为 1.7 eV, 与已报道的文献相符合^[30]。综上所述, 通过 CVD 方法制备出了高结晶质量、单一相态的 Sb_2S_3 单晶材料, 为其后续在新型光电子器件中的应用奠定了坚实的材料基础。

图 2(a) 所示为基于 Sb_2S_3 单晶制备的 MSM 器件, 其中 GaInSn 金属分别作为两端电极。如图 2(b) 所示, 在较低偏压区间, Sb_2S_3 单晶与 GaInSn 电极之间呈现出良好的欧姆接触特性, 并表现出极低的暗电流, 在 0.1 V 偏压下的电流值仅为 3 pA。该暗场下的 I - V 曲线可通过空间电荷限制电流(SCLC)模型进行拟合^[31]。拟合结果表明, 其传导过程可分为三个特征区域: 在低场区为欧姆传导区($I \propto V$), 随电压升高进入陷阱填充限制区($I \propto V^n, n > 1$), 最终在更高电压下过渡到 Child 定律

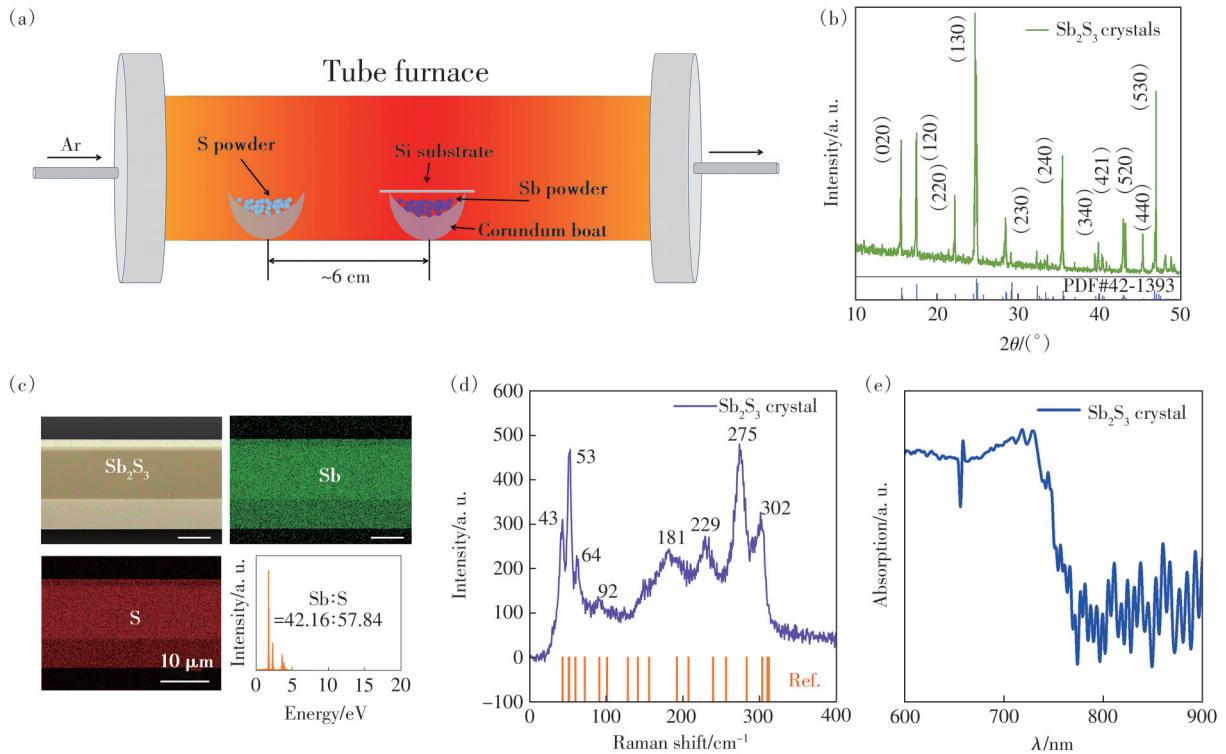


图1 Sb_2S_3 单晶的生长及表征。(a) Sb_2S_3 单晶的CVD生长示意图;(b) Sb_2S_3 单晶的XRD图;(c) Sb_2S_3 单晶的SEM照片及元素分析;(d) Sb_2S_3 单晶的Raman光谱;(e) Sb_2S_3 单晶的吸收谱

Fig.1 Growth and characterization of Sb_2S_3 single crystal. (a) Schematic diagram of Sb_2S_3 single crystal's CVD growth. (b) XRD pattern of Sb_2S_3 single crystals. (c) SEM image of Sb_2S_3 single crystal and element analysis. (d) Raman spectrum of Sb_2S_3 single crystal. (e) Absorption spectrum of Sb_2S_3 single crystal

区($I \propto V^2$)。这一行为表明,在较高偏压下,电流输运会受晶体内部缺陷态对载流子的捕获与释放过程所调控^[31]。基于 SCLC 模型,可利用陷阱填充区的起始电压(V_{TFL})估算器件的陷阱态密度(N_{trap}),计算公式如下所示^[32]:

$$N_{\text{trap}} = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r V_{\text{TFL}}}{qL^2}, \quad (1)$$

其中, ε_0 、 ε_r 、 q 和 L 分别表示真空介电常数、 Sb_2S_3 的相对介电常数(约为7)、基本电荷以及 Sb_2S_3 晶体的长度(约 $150 \mu\text{m}$)。计算得到的 N_{trap} 值约为 $4.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,低于多数报道的其他单晶半导体材料^[33],表明该 Sb_2S_3 单晶具有较高的晶体质量。根据肖克利-里德-霍尔(SRH)非辐射复合理论,如此低的陷阱态密度直接对应于被显著抑制的陷阱辅助非辐射复合通道,有利于光生载流子的有效收集与利用^[34]。

在光电响应性能方面,如图2(c)所示,在波长为 780 nm 的激光照射下,器件表现出显著的光电流响应。光电流随入射光功率密度的增加而单调上升,这表明器件具有有效的载流子光生成、分离与电极收集效率。如图2(d)所示,进一步通过

时间响应测试观察到,器件在周期性光开关激励下表现出稳定、可重复的“开-关”切换行为。另外,在每次光照循环中,器件均表现出快速的上升与衰减过程。光电探测器的响应时间常数主要受限于载流子在陷阱态中的捕获与热释放动力学^[35-36]。由于深部陷阱中的载流子需要更高的热能才能克服陷阱状态与价带/导带边缘之间较大的能量差,因此从深部陷阱中释放的过程所需时间较长^[37]。 Sb_2S_3 单晶 MSM 器件所观测到的快速响应特性表明,其内部深能级陷阱密度低,与前述低陷阱态密度的计算结论相互印证,从而赋予了 Sb_2S_3 单晶适用于高速光电探测应用的潜力。如图2(e)所示,基于 Sb_2S_3 单晶的 MSM 器件在 $300 \sim 800 \text{ nm}$ 波段内表现出优异的光电响应,但随着波长的进一步增加,光电流迅速衰减。器件在大于 900 nm 的波段几乎无响应。我们通过响应度(R)进一步量化器件的光电转换性能。响应度定义为每单位入射光功率所产生的光电流,计算公式如下^[38]:

$$R = (I_{\text{ph}} - I_{\text{d}}) / (PS), \quad (2)$$

其中, I_{ph} 、 I_d 、 P 和 S 分别代表光电流、暗电流、入射光功率密度和有效感光面积 ($\sim 800 \mu\text{m}^2$)。如图 2(f) 所示, 最高响应度出现在 760 nm 附近, 这与

Sb_2S_3 的带隙 ($\sim 1.7 \text{ eV}$) 所决定的本征吸收边基本一致, 说明基于 Sb_2S_3 单晶的 MSM 器件的光谱响应受限于其材料带隙。

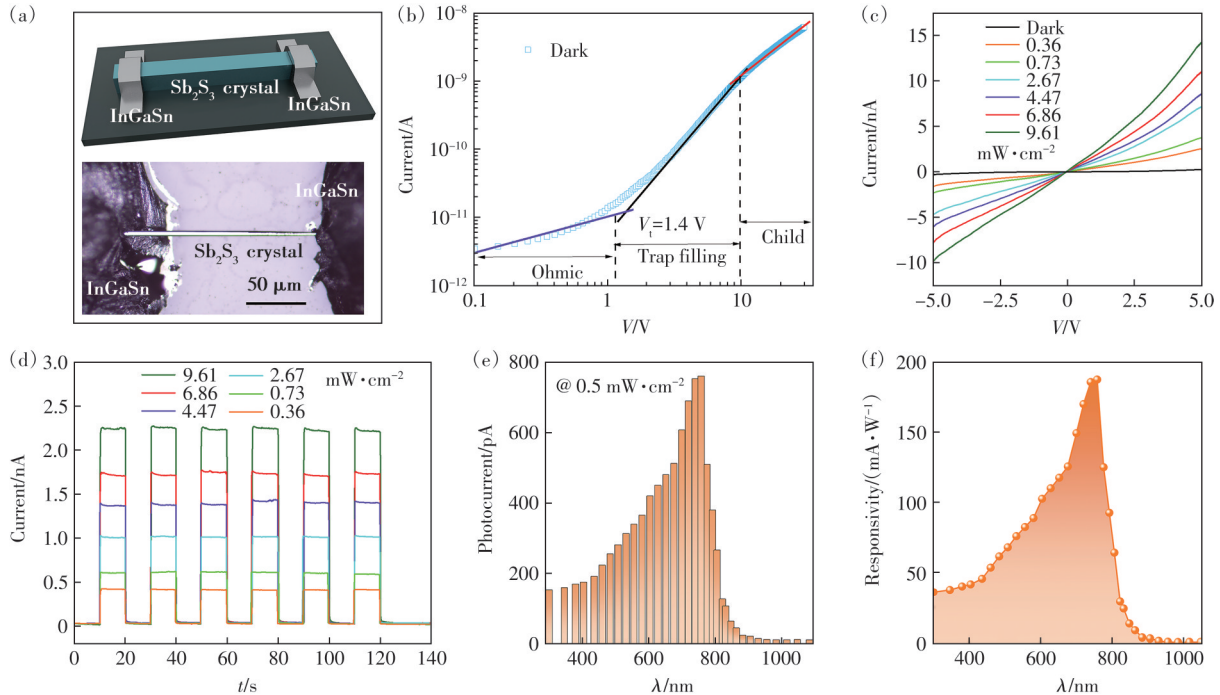


图 2 Sb_2S_3 单晶的 MSM 结构器件的光电性质。(a) 器件示意图和光学显微照片; (b) 器件的暗场 I - V 曲线; (c) 暗场和不同功率密度的光 (波长为 780 nm) 照射下, 器件的 I - V 曲线; (d) 不同功率密度的光 (波长为 780 nm) 照射下, 器件在 1 V 偏压下的 I - t 曲线; (e) 功率密度为 $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 1 V 偏压, 不同波长下器件的光电流; (f) 功率密度为 $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 1 V 偏压, 器件的光谱响应度

Fig.2 Optoelectronic properties of MSM structure devices based on Sb_2S_3 single crystal. (a) Schematic diagram and optical micrograph of the device. (b) Dark-state I - V curve of the device. (c) I - V curves of the device under dark conditions and under illumination with different power densities at a wavelength of 780 nm. (d) I - t curves of the device at 1 V bias under illumination with different power densities at a wavelength of 780 nm. (e) Wavelength-dependent photocurrent of the device under a power density of $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ at 1 V bias. (f) Spectral responsivity of the device at a power density of $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ at 1 V bias

在器件制备之前, 首先测试了 n-GaAs 的 PL 光谱 (图 S2)。n-GaAs 的发射峰中心位于 880 nm 附近, 对应于 GaAs 在室温附近的带边发射。计算可得其带隙能量约为 1.4 eV, 与 GaAs 材料的本征带隙相符^[39]。图 S3 绘制了接触前 Sb_2S_3 与 n-GaAs 的能级示意图。其中, Sb_2S_3 和 n-GaAs 电子亲和势参考已报道的文献^[25-26], 带隙根据实际测试获得。结果表明 Sb_2S_3 的导带底和价带顶高于 n-GaAs, 为典型的 II 型能带排列。我们基于 SCAPS-1D 软件对异质结结构的光电性能进行了仿真。图 3 展示了 $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{n-GaAs}$ 异质结器件的仿真结果。图 3(a) 的能带结构图表明交错排列的能带结构在界面处形成了有利的能带弯曲, 为光生电子-空穴对的空间分离提供了内在驱动力^[40]。如图 3(b) 所示, 器件

在暗场下仿真的 J - V 曲线表现出显著的整流特性, 这主要归因于 $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{n-GaAs}$ 异质结界面内建电场的形成, 也证明仿真过程的正确性。器件的光谱响应度如图 3(c) 所示, 其有效探测范围覆盖 300~870 nm 的宽光谱区域, 并在 870 nm 处达到峰值响应。当宽波段光源入射时, 其物理过程如图 3(d) 所示, 能量较高的短波光光子主要在 Sb_2S_3 层被吸收并产生电子-空穴对, 而能量较低的长波光光子则可穿透至 GaAs 层激发载流子。在内建电场的作用下, Sb_2S_3 中的光生电子向 GaAs 层转移, 同时 GaAs 中的光生空穴向 Sb_2S_3 层转移, 从而实现了高效的空穴分离与定向收集。

缺陷密度是影响器件性能的关键因素。图 3(e) 表明, 随着 Sb_2S_3 层缺陷密度 (N_{trap}) 的增加, 短

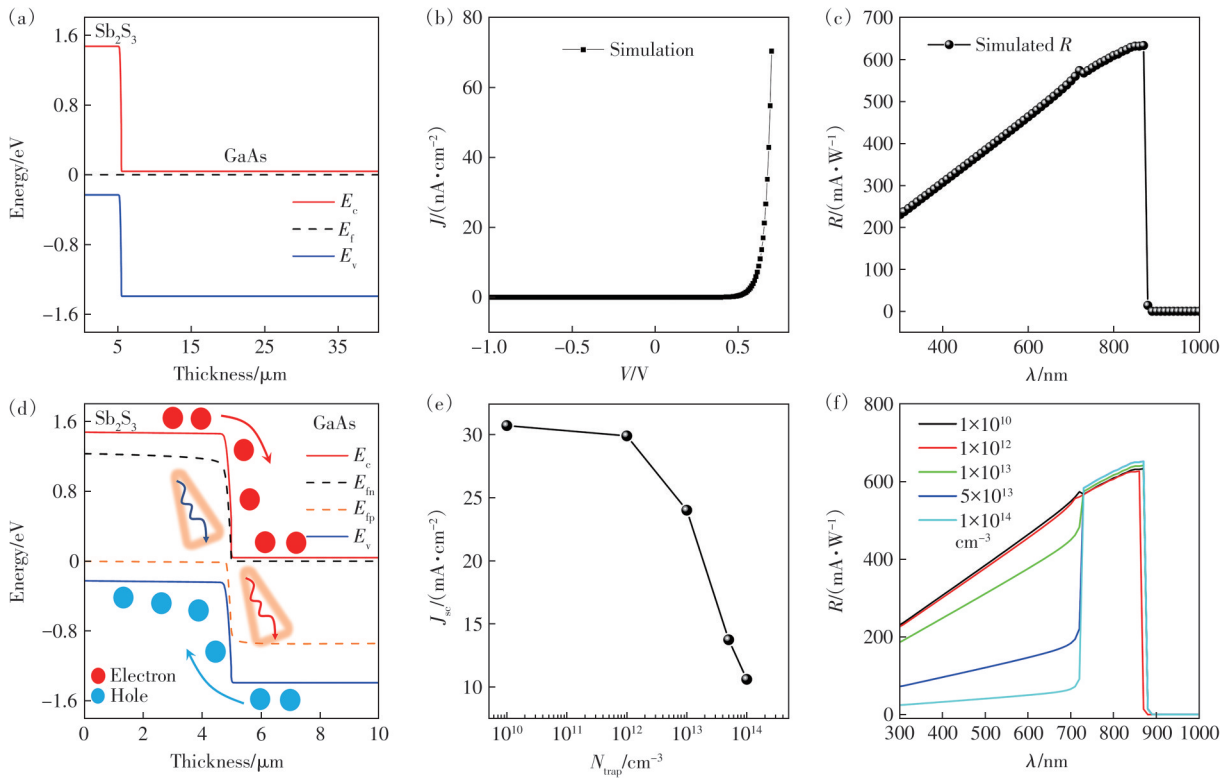


图3 ITO/ Sb_2S_3 /n-GaAs/Au 异质结器件的仿真结果。(a) 器件能带结构图;(b)暗场下器件的 J - V 曲线;(c)器件的光谱响应度;(d)宽波段光入射下器件的能带结构图,其中标注了电子和空穴的输运过程;(e) J_{sc} 与 Sb_2S_3 缺陷密度的关系;(f)不同 Sb_2S_3 缺陷密度下,器件的光谱响应度

Fig.3 Simulation results of the ITO/ Sb_2S_3 /n-GaAs/Au heterojunction device. (a) Energy band diagram of the device. (b) J - V characteristic of the device in the dark. (c) Spectral responsivity of the device. (d) Energy band diagram under broadband illumination, illustrating the transport processes of electrons and holes. (e) Dependence of J_{sc} on the defect density in Sb_2S_3 . (f) Spectral responsivities of the device under different defect densities in Sb_2S_3 .

路电流密度(J_{sc})的下降呈现明显的两阶段特征:在 N_{trap} 较低时($<10^{12} \text{ cm}^{-3}$), J_{sc} 下降缓慢,此时低密度的陷阱密度对光电流的影响有限;当 N_{trap} 升高至 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 范围时, J_{sc} 急剧下降,这是由于高密度缺陷成为有效的非辐射复合中心,严重缩短了载流子寿命,大幅降低了光电流的收集效率。图3(f)进一步揭示了缺陷密度对不同波段光谱响应度的影响机制。可以发现, Sb_2S_3 层的缺陷主要抑制器件在短波区域($<700 \text{ nm}$)的响应度。这是因为短波光子的吸收系数高,其激发的载流子产生区域非常靠近表面(Sb_2S_3 层),这些载流子在向电极输运的路径中更容易被缺陷捕获并复合。因此,随着缺陷密度升高,短波响应度显著衰减。相比之下,长波(红外)光子主要在GaAs层被吸收,其光生载流子产生区域远离 Sb_2S_3 ,受 Sb_2S_3 层缺陷的影响较小,故响应度下降不明显。这一结果清晰地表明,降低 Sb_2S_3 吸收层的体缺陷是提升该异质结器件宽波段探测性能的关键途径。

基于上述研究基础,我们进一步制备了基于ITO/ Sb_2S_3 单晶/GaAs/Cr/Au异质结构的光电探测器。图4(a)展示了该器件的结构示意图,呈现了ITO透明电极、 Sb_2S_3 单晶吸收层、n型GaAs层及Au背电极的堆叠顺序与接触构型,具体制备流程详见实验部分。图4(b)为器件在暗场下的 I - V 特性曲线,其在 $\pm 5 \text{ V}$ 偏压范围内表现出明显的整流行为,整流比约为140,证实了异质结的形成。但是,器件的实际开启电压小于仿真的开启电压。仿真中,ITO/ Sb_2S_3 和 Sb_2S_3 /GaAs界面设置为完美的、无缺陷的异质结,且电极与半导体之间为理想的欧姆接触。然而,实际器件中,金属-半导体和半导体-半导体界面处不可避免地存在界面态、缺陷和偶极层。这些界面态会成为有效的复合中心或提供缺陷辅助隧穿路径,导致实际器件在较低电压下即可产生可观测的电流,从而使实际的开启电压低于理想仿真的预测值。为评估器件噪声特性,我们分析了该探测器在零偏压下的噪声谱,

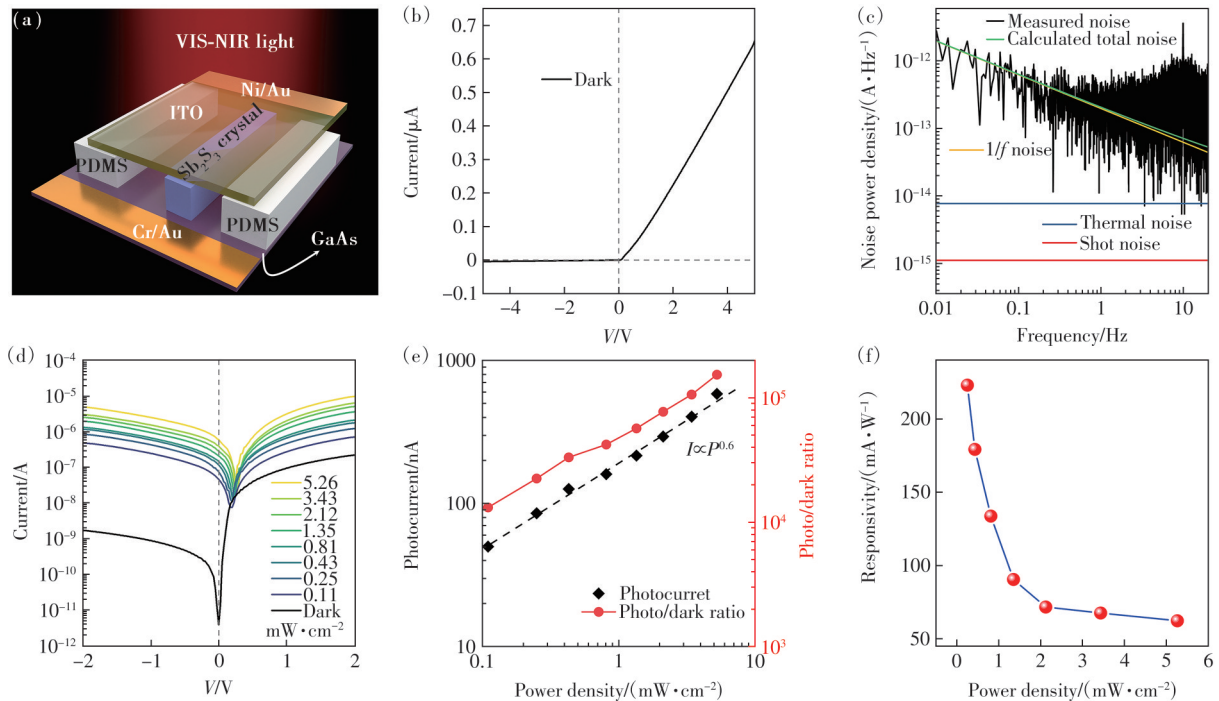


图4 ITO/Sb₂S₃单晶/n-GaAs/Cr/Au异质结器件的光电特性。(a)器件结构示意图;(b)暗场下,器件的*I-V*曲线;(c)器件的噪声谱分析;(d)暗场和不同功率密度的光(波长为780 nm)照射下,器件的*I-V*曲线;(e)光电流和光暗开关比与功率密度的关系;(f)响应度与功率密度的关系

Fig.4 Photoelectrical properties of the ITO/Sb₂S₃ single crystal/n-GaAs/Cr/Au heterojunction device. (a) Schematic diagram of the device structure. (b) *I-V* curve of the device under dark conditions. (c) Noise spectrum analysis of the device. (d) *I-V* characteristics of the device in the dark and under illumination with different power densities at a wavelength of 780 nm. (e) Photocurrent and on/off ratio as a function of optical power density. (f) Responsivity versus optical power density

包括散粒噪声(i_{shot})、 $1/f$ 闪烁噪声($i_{1/f}$)和热噪声(i_{thermal})在内的各类噪声贡献^[41]。图4(c)显示了该异质结探测器在0 V偏压下的频率依赖噪声功率谱。通过对时域暗电流进行快速傅里叶变换得到的总噪声与理论计算值相符。分析表明,在整个测试频段内, $1/f$ 闪烁噪声占据主导地位,这主要源于异质结界面的载流子散射与界面态引起的涨落^[42]。由于器件界面采用机械接触,可以引入界面工程策略(如钝化表面态、低温退火优化减少界面缺陷、引入插入层)以进一步改善接触性能,降低器件的噪声。

图4(d)展示了器件在780 nm激光照射、不同功率密度下的半对数*I-V*曲线,表明其对近红外光具有显著的光电响应。在0 V偏压下,随着入射光功率密度从0.11 mW·cm⁻²增至5.26 mW·cm⁻²,光电流逐渐上升,展现出典型的光伏型探测器工作特征。值得关注的是,如图4(e)所示,即使在较低光功率密度(0.11 mW·cm⁻²)下,器件在0 V偏压时的光暗电流比仍可达10⁴,体现出优异的探测能力与低功耗工作潜力。为深入理解光功率密

度对光电流的影响机制,我们采用幂律关系式 $I_{\text{ph}} = AP^\alpha$ 进行拟合,其中 A 为常数, α 反映了电子-空穴对的产生、分离和复合等物理过程^[43]。拟合结果如图4(e)所示,得到 $\alpha = 0.6$,该值偏离1。这一偏离表明,在较高光强下,界面复合效应增强,导致光电流随光功率的上升呈现亚线性增长,也说明载流子的提取效率受到界面缺陷态和复合中心的制约。如图4(f)所示,在零偏压、780 nm光照条件下,器件在0.11 mW·cm⁻²时获得峰值响应度约225 mA·W⁻¹。随着光功率密度增加,响应度逐渐下降,这主要归因于在高注入条件下,载流子复合加剧以及空间电荷效应导致的收集效率降低。

图5(a)展示了ITO/Sb₂S₃单晶/n-GaAs/Cr/Au异质结光电探测器在不同功率密度的780 nm光照下的*I-T*曲线。该器件在光照开启与关闭时均表现出快速、稳定的电流上升与下降过程,且暗电流与光电流的波动极小,显示出良好的工作稳定性。进一步地,在固定光功率密度为0.4 mW·cm⁻²的条件下,测试了器件的光谱响应特性。如图5(b)所示,该探测器在宽光谱范围(300~1 000 nm)内

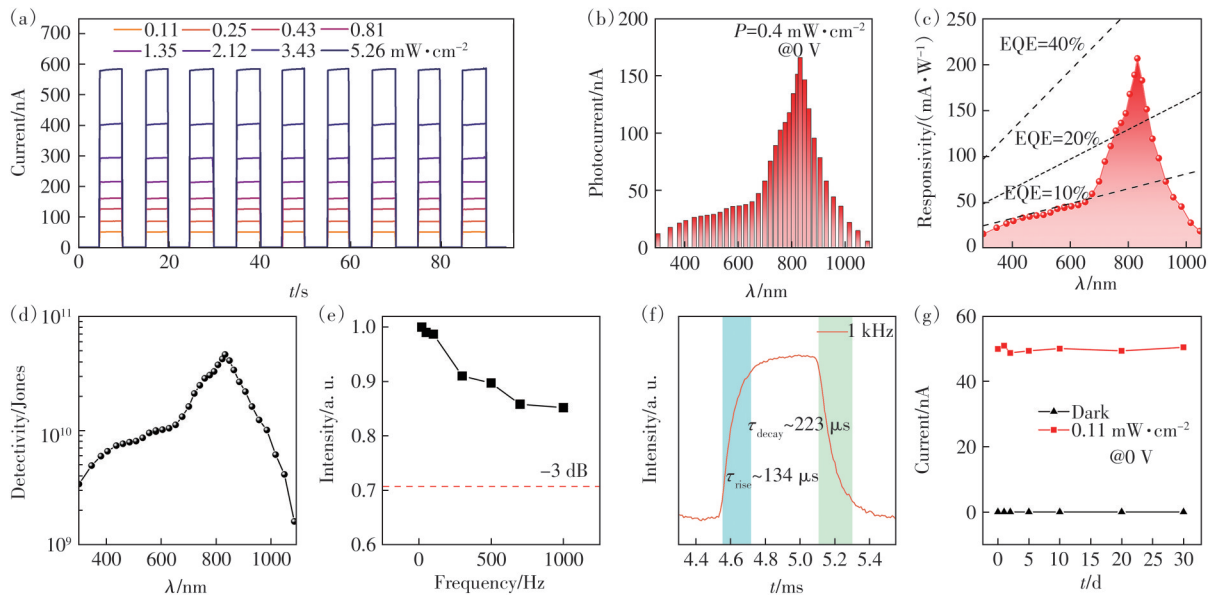


图5 ITO/ Sb_2S_3 单晶/n-GaAs/Cr/Au异质结器件的光电特性。(a)不同功率密度下,器件的 $I-t$ 曲线;(b)功率密度为 $0.4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,不同波长下器件的光电流;(c)功率密度为 $0.4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,器件的光谱响应度,其中虚线标注了不同的EQE;(d)功率密度为 $0.4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,器件波长依赖的比探测率;(e)归一化光响应强度与调制频率的关系;(f)器件的响应速度;(g)不同天数下,探测器的光电流和暗电流变化

Fig.5 Photoelectrical properties of the ITO/ Sb_2S_3 single crystal/n-GaAs/Cr/Au heterojunction device. (a) $I-t$ curves of the device under different optical power densities. (b) Photocurrent of the device at different wavelengths under a power density of $0.4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. (c) Spectral responsivity of the device at a power density of $0.4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, with the dashed line indicating different EQE. (d) Wavelength-dependent specific detectivity of the device at a power density of $0.4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. (e) Normalized photoresponse intensity as a function of modulation frequency. (f) Response speed of the device. (g) Changes in the photocurrent and dark current of the detector under different days

均表现出优异的光电响应,尤其在近红外区域光电流达到最大。响应度随波长的变化如图5(c)所示,最高响应度出现在830 nm处,这与前面理论仿真结果基本一致。在近红外波段出现最大光响应的主要原因是异质结的能带结构与材料吸收特性的协同作用。该范围波长的光子穿透深度较大,光生载流子产生区域更靠近异质结界面,在内建电场作用下能实现分离与收集;同时 Sb_2S_3 对该波段仍有微弱吸收,产生少量载流子。相比之下,短波区域虽吸收强,但光生载流子产生于 Sb_2S_3 表面附近,更易受表面缺陷复合影响且远离异质结界面,实际收集效率相对降低。虽然器件的最高响应度可达 $200 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$,但低于仿真计算值,这是由于仿真模型假设了一个理想的、无缺陷的异质结界面。然而,在实际制备的器件中,界面可能存在固有的缺陷和陷阱态,这些缺陷和陷阱态可作为复合中心影响光电转换的效率。器件的外量子效率在紫外与可见光波段接近10%,而在近红外区域则超过10%,表明其在长波区域具有更高效的光电转换能力。

比探测率(D^*)是衡量探测器探测微弱信号能力的关键指标,其计算公式为^[41]:

$$D^* = \frac{R \sqrt{Sf}}{i_n}, \quad (3)$$

其中, R 为响应度, S 为有效光敏面积($\sim 0.002 \text{ cm}^2$), f 为测量带宽, i_n 为噪声电流的均方根值。基于图5(c)的噪声谱分析,估算得到探测器在单位带宽(1 Hz)下的噪声水平约为 $2 \times 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。如图5(d)所示,该探测器在300~1 000 nm范围内比探测率均高于 10^9 Jones,峰值比探测率超过 3×10^{10} Jones,表明其具备对微弱信号的探测能力。为评估响应速度,采用机械斩波器调制光信号(频率范围20~1 kHz),在零偏压下测试了器件的动态响应(图S4)。在所有测试频率下器件均表现出可重复的光电流响应,进一步验证了其稳定性与快速响应特性。如图5(e)所示,随着调制频率升高,归一化光电流幅值逐渐下降,但在1 kHz时仍高于-3 dB水平。受限于测试设备的频率范围,实际器件的-3 dB带宽显著高于1 kHz。图5(f)展示了在1 kHz调制下器件的瞬态响应曲线,测

得上升时间(10%~90%)约为 134 μs , 下降时间(90%~10%)约为 223 μs 。该响应速度优于大多数已报道的 Sb_2S_3 和 GaAs 异质结光电探测器(见表 1)。其快速响应主要归因于以下因素:首先, Sb_2S_3 单晶与 n-GaAs 之间形成 II 型能带对齐, 光生电子与空穴在界面处实现高效的空穴分离, 分别迁移至 GaAs 与 Sb_2S_3 层中, 显著抑制了载流子复

合, 从而提升了电荷提取效率; 其次, 通过 CVD 制备的 Sb_2S_3 单晶吸收层具有高质量、高均匀性与致密的结构特性, 有效降低了缺陷态密度, 减少了陷阱辅助复合过程, 进一步缩短了响应时间。如图 5(g) 所示, 在常温条件下, 随着天数的增加, ITO/ Sb_2S_3 单晶/n-GaAs/Cr/Au 异质结光电探测器性能无明显衰减, 仍然可以保持工作的稳定性。

表 1 基于 Sb_2S_3 和 GaAs 的探测器性能比较

Tab. 1 Comparison of performance of Sb_2S_3 and GaAs based photodetector

Structures	Bias/V	λ/nm	$R/(\text{mA}\cdot\text{W}^{-1})$	D^*/Jones	$\tau_r/\tau_d/\text{ms}$	Ref.
Au/ Sb_2S_3 nanowire/Au	1	638	1.1×10^6	2×10^{13}	37/38	[30]
Ag/Spiro/ Sb_2S_3 /FTO	1	470	87	2.7×10^9	25/25	[44]
Au/(glass/ TiO_2 : \cdot) Sb_2S_3 /Au	10	530	240	5.3×10^{10}	0.6/11.8	[45]
GaAs/AlGaAs	2	855	570	7.2×10^{10}	—/—	[46]
WS_2 /GaAs	1	365	65.58×10^3	4.47×10^{12}	30/10	[47]
MoS_2 /h-BN/GaAs	0	635	419	1.9×10^{14}	0.017/0.031	[48]
Sb_2S_3 / Sb_2Se_3	0	1064	3.45	1.44×10^{10}	—/—	[16]
Au/ Sb_2S_3 / TiO_2 /FTO	0	650	700	7.4×10^{12}	2.6/3.7	[19]
Sb_2S_3 single crystal/n-GaAs	0	830	200	3×10^{10}	0.134/0.223	This work

虽然 ITO/ Sb_2S_3 单晶/n-GaAs/Cr/Au 异质结器件取得了较好的综合性能, 但仍低于部分先进器件(如钙钛矿、二维材料探测器)。这主要源于以下几点: (1) 虽然 Sb_2S_3 单晶体的缺陷密度仅有 $4.8\times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$, 但 Sb_2S_3 光生载流子极易形成自陷激子, 成为 Sb_2S_3 中一种主导的非辐射复合通道^[49]。另外, 其本征载流子迁移率和少数载流子扩散长度仍然有限, 这也限制了其光电转换效率^[50]。(2) 异质结界面的质量(如界面态密度)对最终性能起着决定性作用, 界面处的缺陷会成为复合中心, 降低载流子收集效率。由于 Sb_2S_3 与 GaAs 采用物理直接接触, 界面仍存在未被完全钝化的悬空键或缺陷态。(3) 当今先进光探测器多集成光学微腔、等离子激元结构或抗反射涂层等^[51], 而本研究制备的原型器件未经过进一步优化, 其光响应度和探测器率相对较低。因此, 在后续研究中, 可以进一步围绕接触优化、界面钝化和光学增强设计等方面展开。

5 结 论

本文成功构建了一种基于 CVD 法制备的高质量 Sb_2S_3 单晶与 n 型 GaAs 衬底的 II 型异质结自驱动光电探测器。通过 SCAPS-1D 仿真与实验验证, 揭示了低缺陷密度($4.8\times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$)的 Sb_2S_3 单晶在抑制载流子复合、提升宽光谱响应方面的关键作用。得益于异质结高效的载流子空间分离机制, 器件在无需外偏压的条件下, 实现了从紫外至近红外(300~1000 nm)的宽谱段探测, 并在 830 nm 处取得 $200\text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$ 的响应度、超过 3×10^{10} Jones 的比探测率及亚毫秒级响应速度(上升/下降时间: 134/223 μs)。本研究证实了 Sb_2S_3 单晶/GaAs 异质结体系在实现高性能、低功耗宽带光电探测方面的潜力, 为下一代自驱动光电器件的开发提供了理论和实验基础。

本文补充文件和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.20250281>

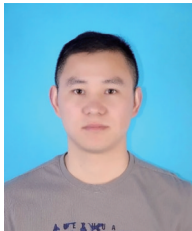
参 考 文 献:

- [1] LI X, LIU K X, WU D, *et al.* Van der Waals hybrid integration of 2D semimetals for broadband photodetection [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(48): 2415717.
- [2] 卢孟涵, 宋宏伟, 陈聪. 钙钛矿基宽谱带光电探测器 [J]. *发光学报*, 2024, 45(6): 876-893.
LU M H, SONG H W, CHEN C. Perovskite based broadband photodetector [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(6): 876-893. (in Chinese)

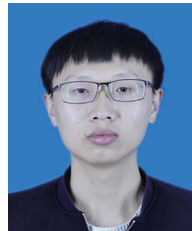
- [3] 李耀江, 石林林, 孙鑫宇, 等. 基于氧化铝界面修饰层的高灵敏度宽谱有机光电探测器 [J]. 发光学报, 2025, 46(10): 1930-1939.
LI Y J, SHI L L, SUN X Y, *et al.* Highly sensitive broad organic photodetector based on alumina interface modification layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(10): 1930-1939. (in Chinese)
- [4] TIAN Y, LIU H, LI J, *et al.* Recent developments of advanced broadband photodetectors based on 2D materials [J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(6): 431.
- [5] YANG G H, LIU T H, LI J P, *et al.* High-speed and broadband InGaAs/InP photodiode with InGaAsP graded bandgap layers [J]. *Sensors*, 2025, 25(9): 2841.
- [6] KUMAR M, HUANG B R, SARAVANAN A, *et al.* Self-powered broadband photodetectors based on Si/SnS₂ and Si/SnSe₂ p-n heterostructures [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2024, 10(11): 2400164.
- [7] GOEL V, KUMAR Y, RAWAT G, *et al.* Self-powered photodetectors: a device engineering perspective [J]. *Nanoscale*, 2024, 16(19): 9235-9258.
- [8] SILVA N E, JAYAKRISHNAN A R, KAIM A, *et al.* Ultra-sensitive, self-powered, CMOS-compatible near-infrared photodetectors for wide-ranging applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(14): 2416979.
- [9] KIM S, KIM M, KIM H. Self-powered photodetectors based on two-dimensional van der Waals semiconductors [J]. *Nano Energy*, 2024, 127: 109725.
- [10] WAN P, JIANG M M, WEI Y, *et al.* Junction-enhanced polarization sensitivity in self-powered near-infrared photodetectors based on Sb₂Se₃ microbelt/n-GaN heterojunction [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(3): 2202080.
- [11] XU Z Y, QIN Q G, MA X F, *et al.* Self-powered broadband UV-NIR photodetectors based on InSe/PtS₂ van der Waals heterostructure [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(30): 2401379.
- [12] XIAO Y K, HE S X, FAN X F, *et al.* Realizing enhanced self-powered broadband photodetection *via* type III band-aligned WSe₂/SnSe₂ van der Waals heterostructure with asymmetric contacts [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2025, 16(35): 8977-8985.
- [13] CHEN J W, LI G Y, XU Z H, *et al.* Recent advances and prospects of solution-processed efficient Sb₂S₃ solar cells [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(18): 2313676.
- [14] SHEN G H, KE A, CHEN S W, *et al.* Strong chelating additive and modified electron transport layer for 8.26%-efficient Sb₂S₃ solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2025, 15(24): 2406051.
- [15] WANG Y, YANG D, JIN M Q, *et al.* Full-dimensional penetration strategy with degradable PEAI enables 8.21% efficiency in bulk heterojunction Sb₂S₃ solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2025, 15(36): 2502805.
- [16] PRAJAPAT P, VASHISHTHA P, GOSWAMI P, *et al.* Sb₂S₃/Sb₂Se₃-based high-performance self-power broadband photodetector [J]. *Next Mater.*, 2025, 6: 100286.
- [17] FU S L, LIU X H, DOU H Y, *et al.* Single-crystalline Sb₂S₃ microtubes for high-performance broadband visible photodetection [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2024, 12(41): 28012-28022.
- [18] FU S L, LIU X H, MAN J X, *et al.* 2D/1D PbI₂/Sb₂S₃ van der Waals heterojunction for highly sensitive and broadband photodetectors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(9): 3353-3364.
- [19] LI S, XU J P, SHI S B, *et al.* Self-powered ultraviolet-visible-near infrared broad spectrum Sb₂S₃/TiO₂ photodetectors and the application in emotion detection [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 511: 161890.
- [20] ZHAO J F, CHENG Y F, CHEN Y Q, *et al.* Defects regulation of Sb₂S₃ by construction of Sb₂S₃/In₂S₃ direct Z-scheme heterojunction with enhanced photoelectrochemical performance [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2021, 568: 150917.
- [21] ZHAI W J, ZHENG W H, ZHANG Z H, *et al.* Improvement in response speed of a AgSbS₂ photodetector by alloy engineering [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2023, 127(37): 18778-18783.
- [22] LIU X Y, LI S Y, LI Z Q, *et al.* Enhanced response speed in 2D perovskite oxides-based photodetectors for UV imaging through surface/interface carrier-transport modulation [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(43): 48936-48947.
- [23] MA Y H, MA C R, YI H X, *et al.* 1D Sb₂S₃ with strong Mie resonance toward highly-sensitive polarization-discriminating photodetection and its application in high-temperature-proof imaging and dual-channel communications [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(5): 2302039.
- [24] BURGELMAN M, NOLLET P, DEGRAVE S. Modelling polycrystalline semiconductor solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 361-362: 527-532.

- [25] SHAH S, HASAN K, BARMAN S C, *et al.* Enhancing PV performance of Al/ZnO/CdS/GaAs/NiO/Au solar cells through diverse layer combinations by SCAPS-1D [J]. *Next Res.*, 2025, 2(1): 100143.
- [26] WANG X J, WU Z X, ZHU J W, *et al.* Design and optimization of the performance of self-powered Sb₂S₃ photodetector by SCAPS-1D simulation and potential application in imaging [J]. *Opt. Mater.*, 2024, 147: 114594.
- [27] CHOI Y C, SEOK S I. Efficient Sb₂S₃-sensitized solar cells *via* single-step deposition of Sb₂S₃ using S/Sb-ratio-controlled SbCl₃-thiourea complex solution [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2015, 25(19): 2892-2898.
- [28] KONDROTAS R, CHEN C, TANG J. Sb₂S₃ solar cells [J]. *Joule*, 2018, 2(5): 857-878.
- [29] SERENI P, MUSSO M, KNOLL P, *et al.* Polarization-dependent Raman characterization of stibnite (Sb₂S₃) [J]. *AIP Conf. Proc.*, 2010, 1267(1): 1131-1132.
- [30] ZHONG M Z, WANG X H, LIU S J, *et al.* High-performance photodetectors based on Sb₂S₃ nanowires: wavelength dependence and wide temperature range utilization [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(34): 12364-12371.
- [31] DUIJNSTEE E A, BALL J M, LE CORRE V M, *et al.* Toward understanding space-charge limited current measurements on metal halide perovskites [J]. *ACS Energy Lett.*, 2020, 5(2): 376-384.
- [32] LE CORRE V M, DUIJNSTEE E A, TAMBOULI OEL, *et al.* Revealing charge carrier mobility and defect densities in metal halide perovskites *via* space-charge-limited current measurements [J]. *ACS Energy Lett.*, 2021, 6(3): 1087-1094.
- [33] WU J M, WANG L X, FENG A B, *et al.* Self-powered FA_{0.55}MA_{0.45}PbI₃ single-crystal perovskite X-ray detectors with high sensitivity [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(9): 2109149.
- [34] GIEBINK N C, FORREST S R. Excitonic Shockley-Read-Hall recombination in organic semiconductors [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2024, 21(6): 064019.
- [35] PENG L S, ZHENG T, WU Z T, *et al.* High-performance ultrafast broadband photodetector based on van der Waals heterojunction through oxygen defect engineering [J]. *J. Alloys Compd.*, 2025, 1011: 178338.
- [36] ZHAO H J, GUO X H, WANG Y F, *et al.* High speed photodetector based on 2D organic/inorganic hybrid van der Waals heterostructure devices [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2024, 18(12): 2400192.
- [37] GU K Y, WU K P, ZHANG Z L, *et al.* Synergistic effect of surface states and deep defects for ultrahigh gain deep-ultraviolet photodetector with low-voltage operation [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(14): 2420238.
- [38] GUAN R Q, XU H, LOU Z, *et al.* Design and development of metasurface materials for enhancing photodetector properties [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(34): 2402530.
- [39] PIRIYEV M, LOGET G, LÉGER Y, *et al.* Dual bandgap operation of a GaAs/Si photoelectrode [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2023, 251: 112138.
- [40] LIU J J, CHEN Z B, WU C, *et al.* Recent advances in antimony selenide photodetectors [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(41): 2406028.
- [41] SUN Z P, ZHANG F Z, CHEN M D, *et al.* Near fully depleted Pt/Sb₂Se₃/ZnO hybrid junctions for high-performance polarized detection and encrypted communication [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(43): 17490-17499.
- [42] KALIMUDDIN S, DAS B, CHATTERJEE S, *et al.* Low-frequency 1/f noise and barrier height inhomogeneity in topological insulator-based photodetectors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(24): 35781-35789.
- [43] WAN P, JIANG M M, SU L X, *et al.* Perpendicularly reversed polarization sensitivity of double-faced photodetection based on Sb₂Se₃ microbelt [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(45): 2207688.
- [44] BERA A, MAHAPATRA ADAS, MONDAL S, *et al.* Sb₂S₃/Spiro-OMeTAD inorganic-organic hybrid p-n junction diode for high performance self-powered photodetector [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(50): 34506-34512.
- [45] JIA Y, DENG H, LIN X, *et al.* Depleted Sb₂S₃ thin film photoconductive detectors with fast response speed and high polarization sensitivity [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 9(2): 2101504.
- [46] DAI X, ZHANG S, WANG Z L, *et al.* GaAs/AlGaAs nanowire photodetector [J]. *Nano Lett.*, 2014, 14(5): 2688-2693.
- [47] LI K L, WANG W J, LI J F, *et al.* High-responsivity, self-driven photodetectors based on monolayer WS₂/GaAs heterojunction [J]. *Photonics Res.*, 2020, 8(8): 1368-1374.
- [48] XU Z J, LIN S S, LI X Q, *et al.* Monolayer MoS₂/GaAs heterostructure self-driven photodetector with extremely high detectivity [J]. *Nano Energy*, 2016, 23: 89-96.

- [49] YANG Z L, WANG X M, CHEN Y Z, *et al.* Ultrafast self-trapping of photoexcited carriers sets the upper limit on antimony trisulfide photovoltaic devices [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 4540.
- [50] SHAH U A, CHEN S W, KHALAF G M G, *et al.* Wide bandgap Sb_2S_3 solar cells [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(27): 2100265.
- [51] KUSHWAHA A, RAJ M, ANSHUL, *et al.* Van der Waals heterostructures for advanced infrared photodetection: innovations in stability and spectral range [J]. *Mater. Today Nano*, 2025, 29: 100582.



周祥博(1989-),男,安徽淮北人,博士,讲师,2022年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事光电功能材料器件与物理的研究。
E-mail: bouncezhou@163.com



万鹏(1992-),男,江苏泰兴人,博士,助教,2023年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事光电功能材料器件与物理的研究。
E-mail: pengwan919@nuaa.edu.cn