

基于有机-无机范德瓦耳斯异质结的自供电日盲光电探测及其单像素点光学成像*

王霞¹⁾ 李磊²⁾ 李山^{2)†} 张嘉汉^{3)‡} 刘增³⁾ 唐为华^{2)††}

1) (山西工程技术学院电气与控制工程系, 阳泉 045000)

2) (南京邮电大学集成电路科学与工程学院(产教融合学院), 氧化镓半导体创新中心(IC-GAO), 南京 210023)

3) (内蒙古大学电子信息工程学院, 光子电子智能感知器件团队, 呼和浩特 010021)

(收到)

日盲紫外光探测在导弹追踪、紫外光通信、生物医疗等领域具有重要的潜在应用价值, 开发具有自供电特性的光电传感器能够解决传统器件依赖外部偏压和能耗高的瓶颈问题. 本文利用新一代超宽禁带半导体氧化镓(Ga_2O_3), 通过在等离子体增强化学气相沉积(PECVD)制备的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜上旋涂聚3,4-乙烯二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)制备了一种有机-无机异质结光电探测器, 并对其光电性能及单像素成像应用潜力进行了研究. 结果表明, 探测器在零偏压、光照强度为 $47\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的254 nm波长日盲紫外光照射下, 光暗电流比为 8.8×10^3 , 光响应度为 $0.106\ \text{A}/\text{W}$, 外量子效率为38%, 并且光电流随光照强度成近线性变化趋势. 说明制备的探测器具备优异的光响应性能. 此外, 该探测器可通过固定步长、逐点扫描、信号采集、数据处理及图像重构的方法, 再现“IMU”字母图像, 展现出其在单像素日盲光学成像方面的应用前景.

关键词: 日盲紫外探测器, 氧化镓, 异质结, 自供电

DOI: [10.7498/aps.75.20251632](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251632)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251632](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251632)

1 引言

日盲紫外光电探测器是指工作在日盲紫外波段(200—280 nm)的光电转换器件, 得益于大气层对该波段光的阻挡, 该类探测器具有抗干扰、高精度的探测能力^[1,2]. 已经成为各类日盲紫外探测系统与专用检测设备的核心组成部分, 在军事、航空、环境监测、电力设备局部放电检测、民用火灾预警等领域有重要的作用^[3-6]. 探测器中光学敏感材料的选择主要依赖于其禁带宽度, 它决定了半导

体材料的光响应波长区间^[7]. 超宽禁带半导体 Ga_2O_3 具有高临界击穿场强、良好的化学、热稳定性和抗辐射抗氧化性、制备成本低廉等优异特性, 主要是其禁带宽度为4.4—5.2 eV^[8], 这使得其成为天然的日盲光探测材料. 目前, 基于 Ga_2O_3 单一材料的探测性能研究取得了一些进展, 主要包括对其光吸收特性和能带工程调制等^[9-11]. 为了克服单一材料实现探测功能上的局限性, 通常需要引入一种具有功能补偿性的光敏材料, 以此来提升光吸收和光/物质相互作用的能力^[12]. 这样一个具备光学吸收和响应特性的异质结体系得以建立. 由于载流子

* 国家自然科学基金(批准号: U23A20349, 62501320)、山西省基础研究计划(批准号: 202103021223388)、江苏省双创团队(批准号: JSSCTD202351)、苏州市科技计划(批准号: SYG2024003)、内蒙古大学实验技术研究项目(批准号: SYJS2025004)和山西工程技术学院科技项目(批准号: 2021QD-15)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shanli@njupt.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jiahan_zhang@outlook.com

†† 通信作者. E-mail: whtang@njupt.edu.cn

在界面处的非平衡扩散,具有一定强度的内建电场的空间电荷区形成^[13].这可以保证探测器可以在没有外界电场驱动的情况下自行分离电子-空穴对.此类无需外部能源驱动的自供电日盲光电探测器能够利用探测光能自驱动工作^[14],可以降低能源消耗和设备维护成本,又能提高系统便携性和稳定性,适用安防与应急监测、深空与极端环境探测、便携与可穿戴设备、工业与电力系统等领域.因此, Ga₂O₃基自供电日盲紫外探测器凭借天然日盲匹配、抗干扰、自供电、低能耗、极端环境适应性和低成本制备等优势,成为推动当前日盲探测领域的最具竞争力的技术路线.目前, Xia等^[15]制备了适用于日盲成像的自供电型 Ga₂O₃基肖特基结光电二极管阵列,在 0 V 偏压下光响应度为 0.17 A/W,外量子效率为 83%,具有自供电特性的高光响应和高效光-电转换效率,可用于成像的光电探测器.

2023年, Li等^[16]制备了基于 GaO_x/ZnO 异质结型自供电紫外光电探测器阵列, 5×4 阵列,在零偏压下的光响应率为 13 mA/W,用于日盲波段成像.阵列式日盲光电传感器成像速度快,能捕捉动态目标,适合对成像实时性、分辨率要求高的场景^[17];为避免信号失真导致的图像还原失真,对阵列元器件性能一致性要求较高、成本较高^[18].单像素日盲光电传感器结合固定步长的成像技术可突破传统面阵成像局限,仅通过单个像素点结合空间编码与数据处理实现成像,无阵列像素间的串扰,对紫外信号的响应更纯粹,在低照度或强对比度场景下,成像灰度层次更细腻,不易出现信号叠加失真^[19].可通过调整扫描步长自由切换“宽视场低分辨率”或“窄视场高分辨率”成像,无需受阵列像素固定排布限制,可适配特殊视场需求,对成像设备尺寸、重量有严格限制的特定成像任务中有独特应用优势,对低成本、原型化的成像需求更友好^[20].

本文将 Ga₂O₃ 薄膜与 P 型高电导率聚合物 PEDOT:PSS 结合,利用二者在能带结构和物理性质上的互补性,构建 PEDOT:PSS/ β -Ga₂O₃ 异质结,深入探究其光电特性和自供电工作特性,该传感器在没有外部电源的情况下,光照强度为 47 μ W/cm² 的 254 nm 波长日盲紫外光照射时,器件光暗电流比为 2.8×10^3 ,光响应度为 0.106 A/W,外量子效率为 38%,表现出较好的光电探测特性,实现对日盲紫外光的高效探测;该传感器通过固定步长方法,可实现单像素成像,图像还原度较好、

质量较高.将 PEDOT:PSS/ β -Ga₂O₃ 异质结应用于单像素成像领域,打破了以往单像素成像材料的局限性,为单像素成像技术带来新的发展思路,具有重要的科学研究价值和实际应用前景.

2 实验

实验包括 Ga₂O₃ 薄膜制备及物性测试、异质结器件制备及性能测试. Ga₂O₃ 薄膜制备及物性测试:使用丙酮、酒精和去离子水依次对蓝宝石衬底进行超声波清洗;然后通过 PECVD 系统,使用高纯度的镓颗粒 (99.99999%) 以及氧气 (O₂) 被用作生长 Ga₂O₃ 的源材料,氩气 (Ar) 作为载气,把蓝宝石衬底放置在石英三脚架上置于炉体中心位置,镓源置于石英管的上游.将炉体加热至 870 $^{\circ}$ C,管内引入氧气和氩气,紧接着激活射频 (RF) 电源. O₂ 流量、Ar 流量和射频功率分别为 20 cm³/min, 20 cm³/min 和 250 W.反应持续 70 min 后,在 Ar 环境下冷却,通过以上方法制备出厚度为 (300 \pm 10) nm 的 Ga₂O₃ 薄膜.利用扫描电子显微镜 (SEM) 和原子力显微镜 (AFM) 对薄膜表面形貌及粗糙度进行表征,再通过 X 射线衍射 (XRD) 对薄膜结晶取向进行验证,最后使用紫外-可见光谱仪得到 Ga₂O₃ 薄膜的紫外-可见 (UV-vis) 吸收光谱.

异质结器件制备及性能测试:通过旋涂方法, β -Ga₂O₃ 薄膜上表面一半使用热熔释放胶带覆盖,未覆盖的一侧旋涂 PEDOT:PSS 溶液,旋涂速度为 4000 r/min,旋涂时间为 30 s,旋涂过程保证匀胶机转速稳定;然后在 120 $^{\circ}$ C 的热板上烘烤 10 min,形成 PEDOT:PSS/ β -Ga₂O₃ 异质结,并在 β -Ga₂O₃ 薄膜和 PEDOT:PSS 薄膜上通过磁控溅射方法制备 Ti/Au (厚度分别为 30 nm 和 50 nm) 导电电极,完成器件制备.再通过 Keysight B1505 A 设备分析仪对器件的光电性能进行测试,最后利用制备的日盲光电传感器进行成像实验.测试中用到的都是波长为 254 nm 的紫外光源.

3 测量结果与讨论

图 1(a) 所示是 β -Ga₂O₃ 薄膜的 SEM 表面形貌图,可以看出通过 PECVD 方法制备的 Ga₂O₃ 薄膜表面平整且均匀性较好.表面粗糙度直接影响制备器件的性能,图 1(b) 中的原子力显微镜图像

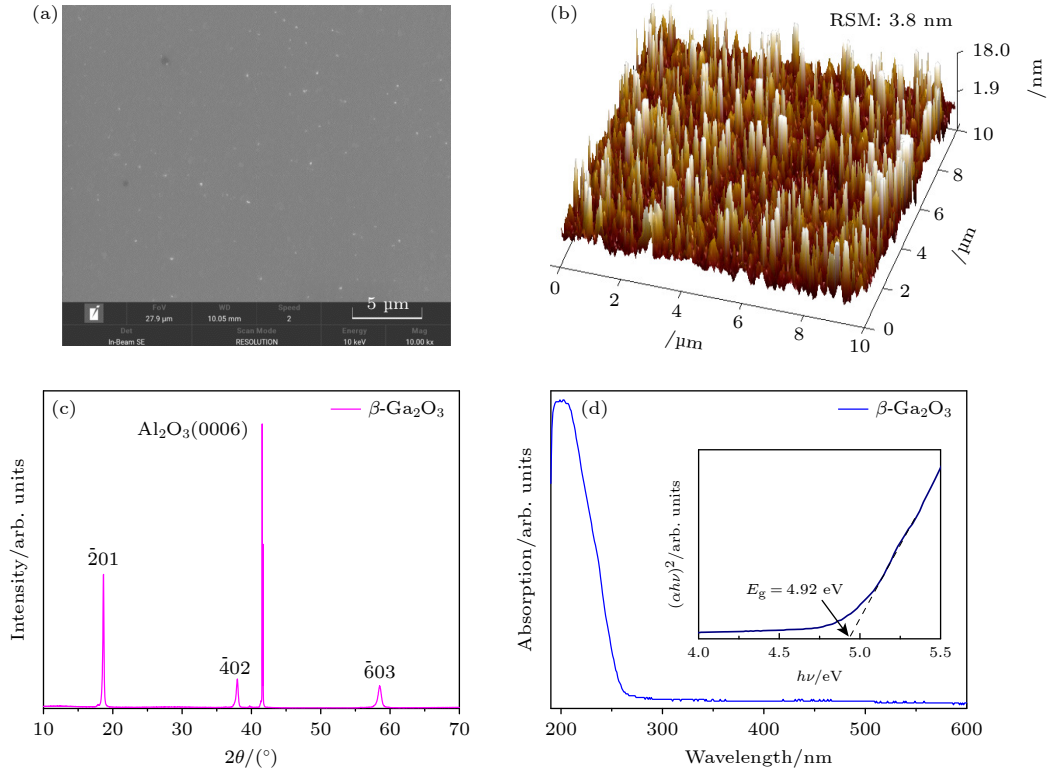


图 1 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜物性 (a) 表面 SEM 照片; (b) AFM 图; (c) XRD 图谱; (d) 紫外-可见光吸收光谱, 内插图 of Tauc 曲线图
 Fig. 1. Physical properties of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin film: (a) The SEM image; (b) AFM image; (c) XRD pattern; (d) UV-Visible absorption spectrum, inset is the Tauc curve diagram.

显示的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜粗糙度为 $\text{RMS}=3.8\text{ nm}$, 表明表面微观不平度较小, 适合高精度电子元件的制造需求. 图 1(c) 所示的 XRD 图谱中, 最高衍射峰对应蓝宝石衬底的 (0006) 晶面, 其他主要衍射峰 ($\bar{2}01$), ($\bar{4}02$), ($\bar{6}03$) 与具有单斜结构的 Ga_2O_3 有很好的匹配度, 表明薄膜结晶性较好. 图 1(d) 是紫外-可见光吸收光谱, 从图中可以看出, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜对日盲紫外波段 (日盲波段范围是 200—280 nm) 光波有很好的选择吸收特性, 是天然的日盲紫外波段探测材料. 插图是通过 Tauc 图法绘制的 $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ 关系图^[19], 其中 h 是普朗克常量, α 为吸收常数, ν 是入射光子频率. 通过线性拟合直线部分与横轴交点确定禁带宽度 E_g 约为 4.92 eV. 图 1 的四幅图表明通过上述方法制备的 Ga_2O_3 薄膜质量较好.

利用上述制备的高质量 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜, 结合 P 型导电聚合物 PEDOT:PSS 制备的 PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质结日盲紫外光电传感器结构如图 2(a) 所示. 图 2(b) 为日盲紫外光电传感器的归一化响应光谱, 测试结果显示器件的响应波长范围为 245—280 nm, 对日盲区紫外光波表现出明显选择和响应特性. 图 2(c) 是器件在无光照和不同光

照强度情况下的对数形式伏安特性曲线, 从图中可见, 光电流随光照强度增加而变大, 器件的暗电流较低, 较低的暗电流可以提升器件灵敏度、减少器件在工作过程中的热量积累和能量损耗, 进而可以延长器件整体使用寿命. 光照强度为 47 mW/cm^2 时, 在 -5 和 5 V 偏压下, I_{light} 分别为 1.79×10^{-7} 和 $2.84\times 10^{-7}\text{ A}$, I_{dark} 分别为 7.35×10^{-12} 和 $8.63\times 10^{-12}\text{ A}$, 光暗电流比分别为 2.43×10^4 和 3.28×10^4 , 表现出较低的暗电流和较高的光暗电流比, 展现出器件良好的灵敏度和探测能力; 零偏压下, 对应的 I_{light} 和 I_{dark} 分别为 $2.34\times 10^{-8}\text{ A}$ 和 $2.65\times 10^{-12}\text{ A}$, 光暗电流比为 8.8×10^3 . 图 2(d) 是在零偏压下, 不同光照强度下器件的 $I-t$ 曲线, 从图中可以看出随着辐照强度的增加, 产生的光电流会越多.

为评估器件在自供电零偏压、不同光照下的光电转换效率、检测光信号能力, 对器件响应度 (R) 和外量子效率 (EQE) 这两个关键参数进行了计算. 公式如下^[21]:

$$R = \frac{I_{\text{photo}}}{S \times P} = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{S \times P}, \quad (1)$$

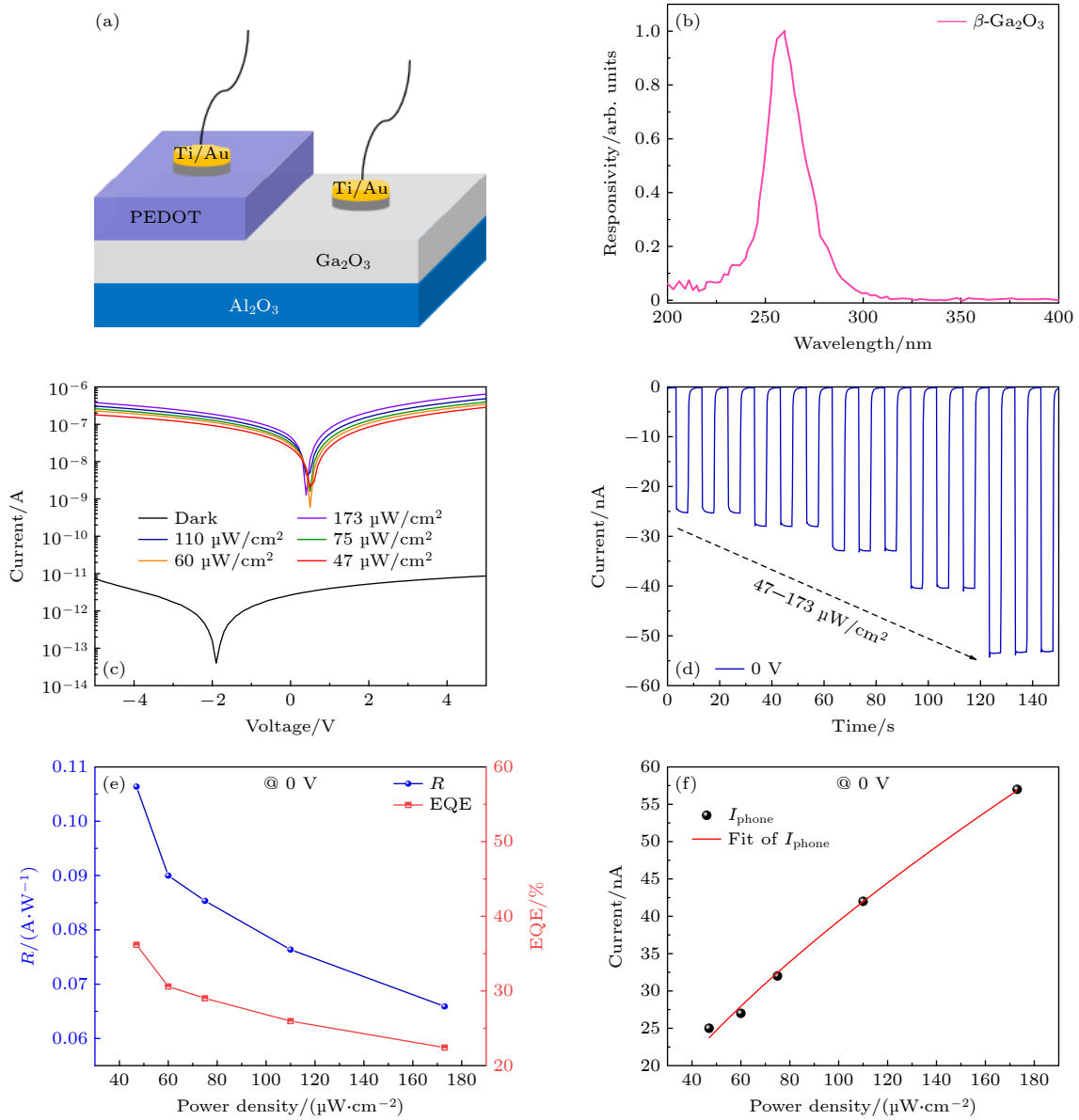


图 2 异质结传感器 (a) 结构示意图; (b) 响应光谱图; (c) 在黑暗和不同光照条件下对数形式的 I - V 特性曲线; (d) 零偏压下, 不同光照强度的 I - t 特性曲线; (e) 零偏压下, 不同光照强度的光响应度和外量子效率; (f) 零偏压下, 光电流随光照强度的变化规律

Fig. 2. Heterojunction sensor: (a) Schematic diagram of the structure; (b) response spectrogram; (c) I - V characteristic curves under dark and different illumination conditions; (d) I - t characteristic curves under zero bias voltage for different illumination intensities; (e) light response sensitivity and external quantum efficiency under zero bias voltage for different illumination intensities; (f) variation law of photocurrent with illumination intensity under zero bias voltage.

其中 I_{photo} 是光电流, I_{light} 是亮电流, I_{dark} 是暗电流, P 为入射光照强度, S 为有效光照面积, h 为普朗克常量, c 为光速, q 为电子电荷量, λ 为入射光波长. 如图 2(e) 所示, 两条曲线分别表示器件 R 和外量子 EQE 随着光照强度的增加呈下降趋势, 并且在光照强度为 47 mW/cm^2 情况下, 器件的 R 和 EQE 最大, 分别为 0.106 A/W 和 38% . 为进一步表征器件自供电特性, 对器件电流随着光照强度的变化规律进行测试, 如图 2(f) 所示, 零偏压下

器件电流随着光照强度呈线性增长趋势.

为了更好地理解 PEDOT:PSS/ β - Ga_2O_3 异质结的自供电特性, 这里绘制了在 0 V 偏压下无光照与 254 nm 光照下的异质结能带示意图 [22,23], 如图 3(a) 和图 3(b) 所示. PEDOT:PSS/ β - Ga_2O_3 异质结是 I 型异质结. PEDOT:PSS 和 β - Ga_2O_3 在形成异质结时, 由于异质结两侧存在载流子浓度差, 界面处的电子会从 β - Ga_2O_3 转移到 PEDOT:PSS, 空穴与其方向相反, 形成内建电场, 并由 β - Ga_2O_3

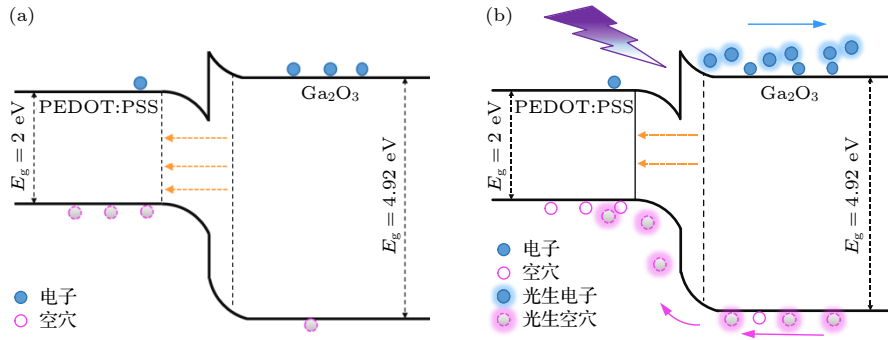


图 3 PEDOT:PSS/ β -Ga₂O₃ 异质结能带示意图 (a) 无光照; (b) 254 nm 光照

Fig. 3. Energy band diagrams of the PEDOT:PSS/ β -Ga₂O₃ hybrid heterojunction under (a) dark and (b) 254 nm light irradiation.

指向 PEDOT:PSS. 254 nm 光照下, 光生电子-空穴对在内建电场作用下能有效地分离, 产生光生电动势, 在异质结与外电路接通的情况下, 会产生持续的光生电流, 实现无外部偏压下的自供电特性.

图 4(a) 和图 4(c) 是偏压在 -3 和 3 V 下, 不同光照强度下器件的 $I-t$ 特性曲线. 图 4(b) 和图 4(d) 是 -3 和 3 V 偏压下, 电流对光照强度的增加呈线性增加. 可见, 器件在正偏电压和反偏电压下都可

以进行工作.

为衡量光电传感器的探测性能, 分别计算了不同偏压下的 R , EQE 和归一化探测度 D^* . 图 5(a) 和图 5(b) 分别是器件在光照一定的情况下, 不同偏压下的 $I-t$ 特性曲线, 利用 (1) 式和 (2) 式, 通过换算可以得到对应的 R 和 EQE, 如图 5(c) 所示, 在正向偏压下, 电压越大, R 和 EQE 越大, 这是由于正向电压可削弱内建电场、降低载流子复合损

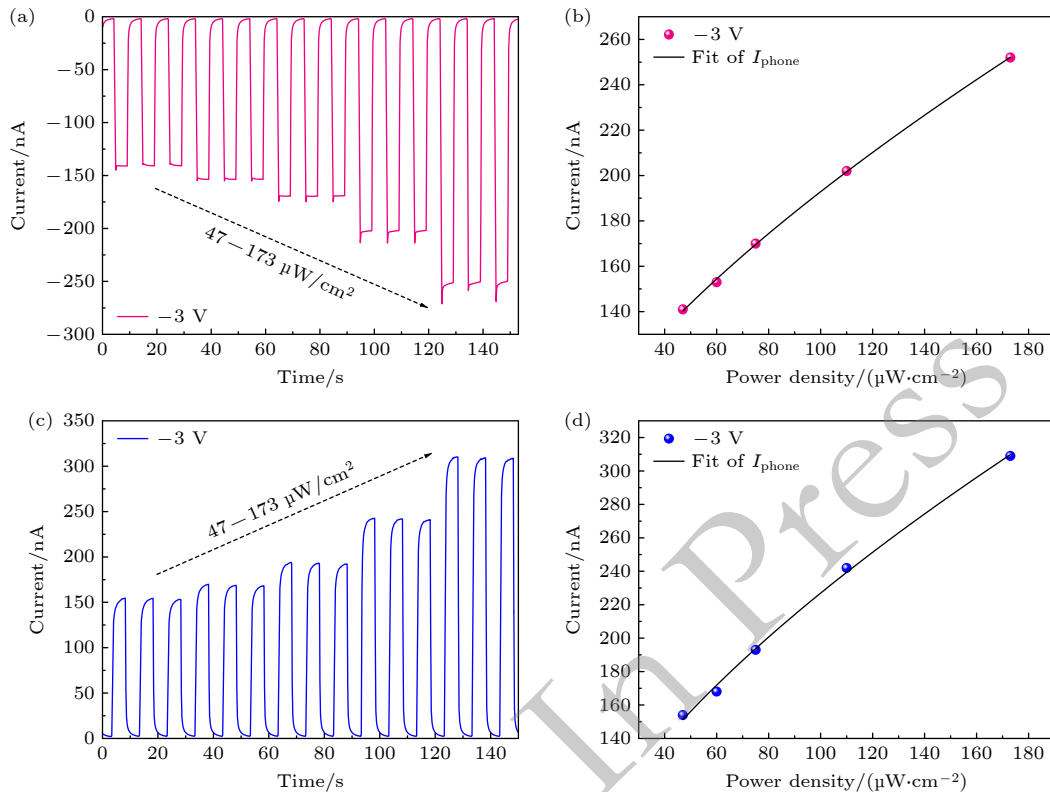


图 4 不同光照条件下 (a) 偏压为 -3 V 的 $I-t$ 特性曲线; (b) 偏压为 -3 V 时, 电流随光照强度的变化曲线; (c) 偏压为 3 V 的 $I-t$ 特性曲线; (d) 偏压为 3 V 时, 电流随光照强度变化曲线

Fig. 4. Characteristics curves of $I-t$ under different lighting conditions: (a) $I-t$ curve with bias voltage of -3 V; (b) curve of current variation with light intensity when the bias voltage is -3 V; (c) $I-t$ curve with bias voltage of 3 V; (d) curve of current variation with light intensity when the bias voltage is 3 V.

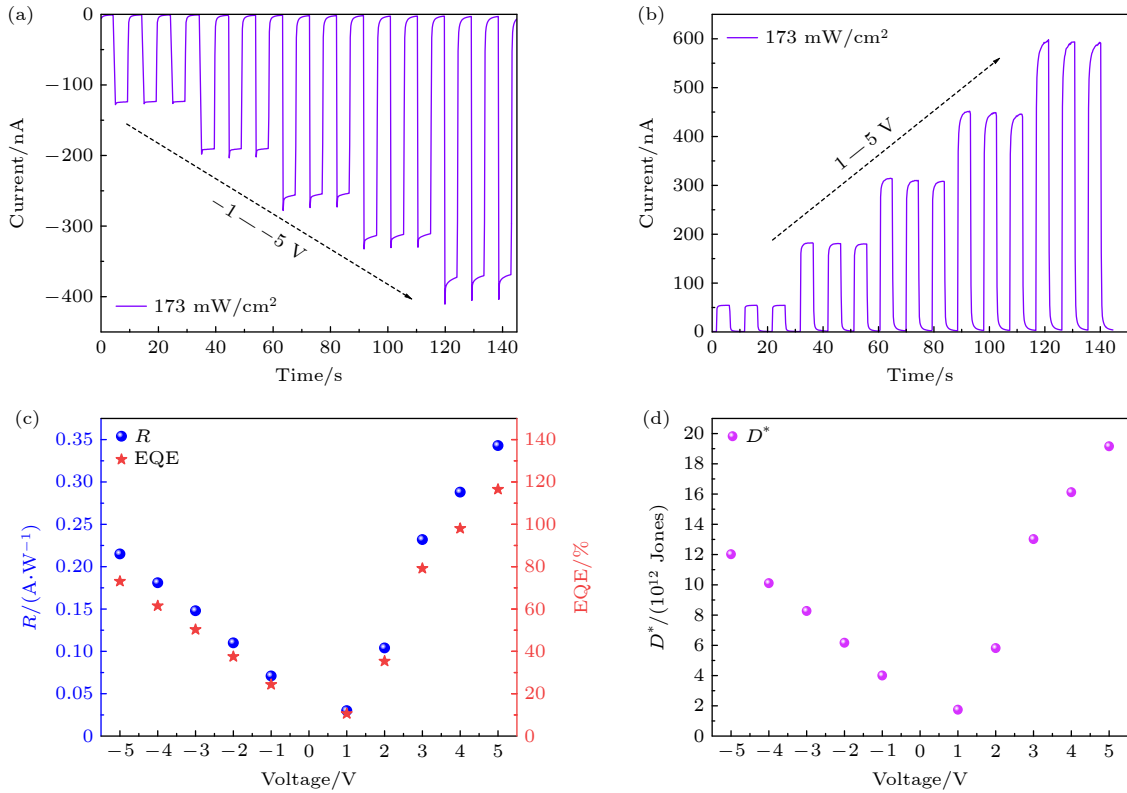


图 5 光照为 $173 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (a) 不同负偏压下的 $I-t$ 特性曲线; (b) 不同正偏压下的 $I-t$ 特性曲线; (c) 不同偏压下的响应度和外量子效率; (d) 不同偏压下的归一化探测度

Fig. 5. Illumination of $173 \mu\text{W}/\text{cm}^2$: (a) $I-t$ characteristic curves under different negative bias voltages; (b) $I-t$ characteristic curves under different positive bias voltages; (c) responsivity and external quantum efficiency under different bias voltages; (d) normalized detection efficiency under different bias voltages.

耗, 提升载流子输运效率, 让更多光生载流子形成有效光电流. 图 5(d) 为器件在不同偏压下的归一化探测度 D^* . D^* 计算公式^[24] 如下:

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{2qI_{\text{dark}}/S}} \quad (3)$$

其中 R 为响应度, q 为电子电荷量, S 为有效光照面积, I_{dark} 为暗电流. 表 1 列出了近年来报道的基于 Ga_2O_3 的有机-无机异质结光电探测器自供电性能对比. 结果表明, 本文制备的器件综合性能较好, 其中暗电流较低, 背景噪声小, 灵敏度高, 适合低

噪声通讯与探测^[29].

通过以上方式制备的 Ga_2O_3 基有机/无机异质结日盲光电传感器可作为单像素日盲光电传感器用于成像. 由于单像素传感器的感光单元仅能检测“某一时刻入射光总强度”, 无法区分来自图像的哪个位置, 因此, 采用固定步长逐点扫描机制, 让传感器依次扫描图像的每个区域像素点, 并通过电信号记录每个子区域光强, 从而建立光学扫描空间位置信息与传感器输出光强信息之间的一一对应关系, 再通过后续信号处理反向重构

表 1 有机/无机异质结自供电性能比较

Table 1. Comparison of self-powered performance of organic / inorganic heterojunctions.

heterostructure	$R/(\text{mA} \cdot \text{W}^{-1})$	EQE/%	$I_{\text{photo}}/\text{nA}$	$I_{\text{dark}}/\text{nA}$	Ref.
PEDOT:PSS:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (254 nm 光强为 $47 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)	106	38	23.4	2.65×10^{-3}	This work
CuPc/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (254 nm 光强为 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)	0.55	-	12	-	[25]
$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ /polyaniline (250 nm 光强为 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)	21	-	5×10^{-2}	-	[26]
PEDOT:PSS:PSS@Gr/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ microwire	65	33	-	-	[27]
PEDOT:PSS:PSS/ Ga_2O_3 /p-Si	-	15	73	8.46	[28]

图像^[30-32].

如图 6(a) 所示, 254 nm 波长紫外光通过有“IMU”图样的掩膜板, 然后按照固定步长连续移动单像素光电传感器, 遍历成像区域, 记录对应位置序列传感器的输出电信号, 由于传感器输出的电信号与照射在传感器上的光照强度存在对应关系, 故经过信号处理可反向重构完整“IMU”图像, 如图 6(b) 所示. 这种单像素成像的核心是空间位置信息与光强信号的一一对应. 扫描步长越大, 成像区域空间采样点数量减少, 相邻采样点间的细节信息无法捕捉, 成像出现“像素化模糊”; 扫描步长越

小, 空间采样点数量增加, 成像分辨率与细节还原度提升, 但会增加扫描时长与数据处理量, 降低成像效率, 故扫描步长要根据应用需求进行调整. 与传统阵列式成像方式相比, 采用固定步长成像的自供电单像素日盲光电传感器, 无阵列像素间的串扰, 无阵列中元器件一致性要求, 制备难度和成本都更为低廉; 成像更具灵活性, 可通过调整扫描步长切换分辨率, 可适配特殊视场需求; 器件具有自供电特性, 结构简单, 成本低, 噪声小, 便携且可靠性较高, 在日盲紫外光成像特定应用场景中具有独特价值^[33-36].

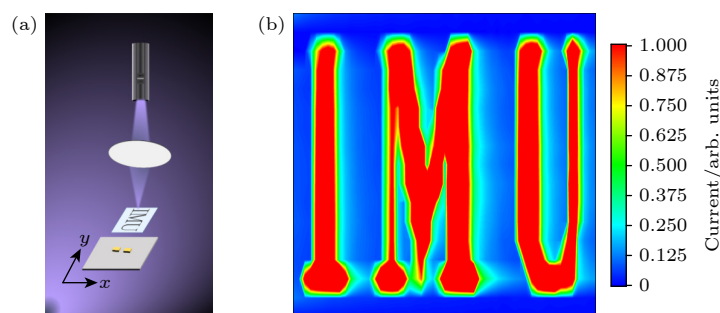


图 6 日盲光电传感器成像 (a) 示意图; (b) 成像系统获得的实物图像

Fig. 6. Image of the day-blind photoelectric sensor: (a) Schematic diagram; (b) physical image obtained by the imaging system.

4 结 论

本文研究制备了一种可自供电工作的有机/无机范德瓦耳斯异质结日盲光电传感器, 并对其性能及成像应用进行了深入研究. 偏压在 ± 5 V 以内的暗电流 $< 10^{-11}$ A, 噪声低, 具有较好的弱光探测能力和灵敏度; 254 nm 波长的紫外光照射下, 光电流与光强呈现良好的线性关系; 光照强度为 $47 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的零偏压自供电工作情况下, I_{light} 和 I_{dark} 分别为 2.34×10^{-8} A 和 2.65×10^{-12} A, 光暗电流比为 8.8×10^3 , 响应度 R 和外量子 EQE 分别为 0.106 A/W 和 38%, 具有较好的日盲光探测性能, 且该传感器在正向偏压和反向偏压下均可工作. 此外, 该器件可用于日盲光电传感器的自供电单像素点光学成像. 在成像应用研究中, 基于单像素成像原理搭建的成像系统, 成功实现了“IMU”图案样品的日盲紫外光探测成像. 成像结果清晰, 能够准确分辨字母, 成像质量良好. 将“自供电”的自驱动节能特性与“单像素成像”的结构简单优势相结合, 在成像领域展现出独特且不可替代的价值, 尤其适用

于传统传感器难以覆盖的场景, 且具有成本低廉、结构简单、器件小巧、节能环保、低噪声等优点, 具有一定的研究意义.

参考文献

- [1] Yang J, Liu K, Chen X, Shen D 2022 *Prog. Quantum Electron.* **83** 100397
- [2] Li Z, Yan T, Fang X 2023 *Nat. Rev. Mater.* **8** 587
- [3] Zhang Y, Liu Y W, Zhang J Y, Jiao B B, Wang R Z 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 098501 (in Chinese) [张裕, 刘瑞文, 张京阳, 焦斌斌, 王如志 2024 物理学报 **73** 098501]
- [4] Liu Z, Xi Z Y, Gu L H, Yan S H, Li L, Shu L C, Zhang J H, Zhang S H, Bian A, Jiang M M, Tang W H 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** e01855
- [5] Dong D M, Wang C, Zhang Q Y, Zhang T, Yang Y T, Xia H C, Wang Y H, Wu Z P 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 097302 (in Chinese) [董典萌, 汪成, 张清怡, 张涛, 杨永涛, 夏翰驰, 王月晖, 吴真平 2023 物理学报 **72** 097302]
- [6] Yang R, Yang S L, Qian L X 2024 *Opto-Electron Eng.* **51** 240116 (in Chinese) [杨瑞, 杨斯钰, 钱凌轩 2024 光电工程 **51** 240116]
- [7] Liu Z, Xi Z, Gu L, Yan S, Zhang R, Zhang X, Wang H, Zhang J H, Tang W 2025 *Nanotechnology* **36** 362001
- [8] Shi J, Zhang J, Yang L, Qu M, Qi D C, Zhang K H L 2021 *Adv. Mater.* **33** 2006230
- [9] Lü Y, Zhao Y, Shi F, Li Z, Xiao Z, Wu X, Nie Z, Wu Q, Song Y, Fang Y 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 162104

- [10] Xi Z, Liu Z, Yan S, Liu M, Zhang J H, Guo X, Li L, Ma W, Li S, Yang L, Jiang M, Tang W 2024 *J. Phys. Chem. Lett.* **15** 4906
- [11] Liu Z, Sha S L, Shen G H, Jiang M M, Zhang M L, Guo Y F, Tang W H 2023 *IEEE Electron Device Lett.* **44** 1324
- [12] Chen X, Zhao H, Fei R, Huang C, Qiao J, Sun C, Zhu H, Zhan L, Hu Z, Li S, Yang L, Tang Z, Wang L, Shi Y, Ji W, Xu J B, Gao L, Gan X, Wang X 2025 *Sci. Adv.* **11** eadw3969
- [13] Nguyen T M H, Shin S G, Choi H W, Bark C W 2022 *Exploration* **2** 20210078
- [14] Wu C, Wu F, Hu H, Wang S, Liu A, Guo D 2022 *Mater. Today Phys.* **28** 100883
- [15] Xia K, Liu Z, Li S, Feng G, Guo Y, Tang W 2024 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **36** 143
- [16] Li X D, Wang X, Luo J S, Jiang J J, Ding K, Ye K D, Xiong Y Q, Pang D, Li H, Yu P, Kong C Y, Ye L J, Zhang H, Li W j 2023 *Mater. Today Commun.* **35** 106118
- [17] Deng W L, Fan X Y, Du Y X, Ma S Y, Zhang H X, Liu M T, Zhang H, Chen S, Fu Q, Zhang Y M, Li Y, Han S Y, Wang Y, Yao T, Wang X J, Song B 2025 *Adv. Mater.* **38** e14968
- [18] Guo Z J, Li L, Xu R M, Liu S Y, Yu N M, Yang Y, Wu L S 2024 *Sensors* **24** 7057
- [19] Wang H B, Zhou C, Li P, Yang L, Ma J G, Akaike R, Miyake H, Xu H Y, Liu Y C 2025 *Nat. Commun.* **16** 8175
- [20] Bie S H, Tong X X, Lü Z Y, Te H Y, Cao T 2025 *Sci. Adv.* **11** eadw4799
- [21] Tauc J, Grigorovici R, Vancu A 1966 *Phys. Stat. Sol.* **15** 627
- [22] Lin P, Yan X Q, Zhang Z, Shen Y W, Zhao Y G, Bai Z M, Zhang Y 2013 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **5** 3671
- [23] Ma J, Zheng M, Chen C, Zhu Z, Zheng X, Chen Z, Guo Y, Liu C, Yan Y, Fang G 2018 *Adv. Funct. Mater.* **9** 35958
- [24] Razeghi M, Rogalski A 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 7433
- [25] Zhao T L, He L, Wu C, Lai L, Ma Y X, Yang H, Hu H Z, Liu A P, Guo D Y, Wang S L 2023 *ACS Appl. Nano Mater* **6** 3856
- [26] Wang Y F, Li L, Wang H B, Su L X, Chen H Y, Bian W P, Ma J G, Li B S, Liu Z G, Shen A D 2020 *Nanoscale* **12** 1406
- [27] Wang Y J, Han Y R, Wang Y F, Song Y H, Fu S H, Gao C, Li B S, Shen A D, Liu Y C 2025 *J. Mater. Chem. C* **13** 21750
- [28] Zhang D, Zheng W, Lin R C, Li Y A, Huang F 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1900935
- [29] Chen Z C, Ji F, Li Y D, Wang Y H, Ge X H, Jiang K, Zhu H, Wang X H 2025 *Chin. Phys. B* **34** 128501 (in Chinese) [陈志超, 季枫, 李亚丹, 王雅涵, 葛薛豪, 姜凯, 朱海, 王相虎 2025 中国物理 B **34** 128501]
- [30] Ozdiev A H, Afornu B K, Sednev D A 2019 *Res. Nondestr. Eval.* **30** 179
- [31] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J 2019 *Nat. Photonics* **13** 13
- [32] Duvenage A, du Plessis W 2023 *Electro-Opt. Infrared Syst. : Technol. Appl.* **XX** **12737** 127370H
- [33] Ma Y J, Chen T W, Zhang X D, Tang W B, Feng B Y, Hu Y, Zhang L, Zhou X, Wei X, Xu K 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 35194
- [34] An R, Xiong S M, Wu H, Mai W J, Ji Z, Liu Y J, Xia C Q, Li Y P 2025 *Laser Phys. Lett.* **22** 065202
- [35] Lu T A, Qiu Z H, Zhang Z B, Zhong J G 2020 *Opt. Lasers Eng.* **134** 106301
- [36] Zhang H Y, Zeng C H, Chen T W, Zhang L, Guo G F, Li Z C, Hu Y, Zou Z L, Zhang X D, Shi W H, Zeng Z M, Zhang B S 2025 *IEEE Electron Device Lett.* **46** 60

Self-powered solar-blind photodetector and single-pixel optical imaging based on organic-inorganic van der Waals heterojunctions*

WANG Xia¹⁾ LI Lei²⁾ LI Shan^{2)†} ZHANG Jiahan^{3)‡}
LIU Zeng³⁾ TANG Weihua^{2)††}

1) (Department of Electrical Engineering and Automation, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China)

2) (the Innovation Center of Gallium Oxide Semiconductor (IC-GAO), College of Integrated Circuit Science and Engineering (College of Industry-Education Integration), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

3) (School of Electronic Information Engineering, Electronic-Photonic Smart Sensing Device Research and Development Team, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

(Received)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U23A20349, 62501320), the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202103021223388), the Jiangsu Provincial Team of Innovation and Entrepreneurship, China (Grant No. JSSCTD202351), the Key Technology Project of Suzhou City, China (Grant No. SYG2024003), the Inner Mongolia University Experimental Technology Research Project in 2025, China (Grant No. SYJS2025004), and the Science and Technology Project of Shanxi Institute of Technology, China (Grant No. 2021QD-15).

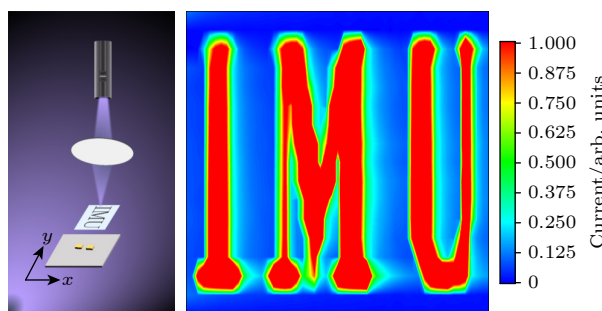
† Corresponding author. E-mail: shanli@njupt.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jiahan_zhang@outlook.com

†† Corresponding author. E-mail: whtang@njupt.edu.cn

Abstract

Solar-blind ultraviolet photodetector holds significant application potential in fields such as military defense, communication, medical treatment, and environmental monitoring. Developing self-powered detectors is essential for eliminating the dependence on external bias voltage and reducing high energy consumption of traditional devices. In this study, high-quality $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films were prepared via plasma-enhanced chemical vapor deposition and which were subsequently combined with spin-coated PEDOT:PSS to fabricate an organic-inorganic van der Waals heterojunction self-powered solar-blind photodetector. Its photoelectric performance and potential for single-pixel imaging applications were systematically investigated. Structural characterization reveals that the prepared $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin film exhibits good crystallinity and a smooth surface, with selective absorption in the solar-blind ultraviolet region and an optical bandgap of approximately 4.92 eV. Under zero bias and 254 nm illumination at intensity of $47 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, the detector achieves a photo-to-dark current ratio of 8.8×10^3 , a responsivity of 0.106 A/W, and an external quantum efficiency of 38%. The photocurrent exhibits a near-linear dependence on light intensity. The device operates stably under both positive and negative bias, with low dark current, minimal noise, and excellent weak-light detection capability. By employing a fixed-step point-by-point scanning method, the detector achieved single-pixel solar-blind ultraviolet optical imaging of the letters “IMU”, demonstrating good imaging quality and high fidelity. The heterojunction detector developed in this study combines the advantages of self-powered operation, simple structure, and low cost, overcoming the limitations of traditional materials used in single-pixel imaging approaches, thereby offering a promising strategy for improving solar-blind ultraviolet detection technology and demonstrating significant potential for practical applications in the field of single-pixel optical imaging.



Keywords: solar-blind ultraviolet photodetector, gallium oxide, heterojunction, self-power

DOI: [10.7498/aps.75.20251632](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251632)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251632](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251632)