

具有高光响应度与外量子效率的 $\text{CsPbIBr}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 范德瓦耳斯异质结自供电探测器*

孟祥熙¹⁾ 马鲁金¹⁾ 陈韦铭¹⁾²⁾ 王新睿¹⁾ 晏祖勇³⁾

张嘉汉^{1)4)5)†} 张少辉^{6)†} 刘增^{1)5)†}

- 1) (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)
- 2) (内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010021)
- 3) (兰州理工大学微电子现代产业学院, 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)
- 4) (内蒙古北科交大机器人有限公司, 包头 014020)
- 5) (内蒙古大学, 内蒙古自治区智慧通信感知与信号处理重点实验室, 呼和浩特 010021)
- 6) (广东省科学院生物与医学工程研究所, 广东省医用电子仪器及材料重点实验室, 广州 510316)

摘要

本文报道了一种基于 $\text{CsPbIBr}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 范德瓦耳斯异质结的自供电深紫外光电探测器, 该器件通过等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 和热滴注法 (hot-casting) 结合制备. X 射线衍射和扫描电子显微镜表征证实了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 与 CsPbIBr_2 的薄膜质量. 并通过 Tauc 曲线得出 Ga_2O_3 和 CsPbIBr_2 的光学带隙分别为 4.75 eV 和 2.03 eV. 根据安德森法则 (Anderson's rule) 证实了该范德瓦耳斯异质结为具有稳定界面内建电场的 II 型能带排列. 该器件在 10 V 偏压下具有极低的暗电流密度 ($2.09 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$) 以及高达 4.01×10^3 的光暗电流比. 得益于界面处的内建电场, 该探测器在零偏压下实现了稳定且可重复的光响应, 展现出优异的自供电能力. 在 254 nm 深紫外光照射及 10 V 偏压下, 该探测器获得了 0.17 A/W 的光响应度、85% 的外量子效率, 以及高达 2.98×10^{12} Jones 的比探测率. 综上, 本研究为高性能自供电日盲紫外光电探测提供了一种可借鉴的路径.

关键词: 氧化镓, 钙钛矿, 异质结, 探测器, 自供电

基金: 国家自然科学基金 (批准号: 62564011, 62204125, 62501320)、内蒙古自治区自然科学基金青年科学基金 A 类 (批准号: 2026QA016)、内蒙古自治区直属高校基本科研业务费 (青年科技人才培养项目) (批准号: 2026JBKY002)、甘肃省自然科学基金 (批准号: 25JRRA087)、内蒙古大学“骏马计划”高层次人才引进基金 (10000-A24199006, 10000-A24106015)、内蒙古自治区“英才兴蒙”工程本级事业单位引进高层次人才科研支

持（批准号：21700-252904， 21700-252905）、内蒙古大学实验技术研究项目（批准号：SYJS2026007）、兰州市青年科技人才创新项目（批准号：2025-QN-080）和兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划资助的课题。

† 通信作者.E-mail: jiahan_zhang@outlook.com, shzhang2016@sinano.ac.cn, zengliu@imu.edu.cn

第一作者.E-mail: 32556090@mail.imu.edu.cn

1 引言

智能固态紫外（UV）光电探测器作为火灾报警、智能通信以及卫星定位等领域中极具前景的核心器件受到了广泛的关注^[1]. 光电探测性能和传感波长严重依赖于所用光敏半导体材料的本征属性，尤其是光学带隙（ E_g ）与光吸收特性^[2,3]. 带隙大于 3 eV 的宽禁带半导体，凭借其在光吸收光谱中特有的截止波长优势，为开发高性能紫外探测器提供了绝佳机遇^[4,5]. 其中，氧化镓（ Ga_2O_3 ）因具有约 4.8 eV 的带隙^[6]，在构建 200-280 nm 日盲深紫外（DUV）光电探测器方面展现出巨大潜力；其无需复杂的合金化或掺杂工程^[7,8]，且受外界干扰较小. 同时， Ga_2O_3 优异的热稳定性和化学稳定性确保了其在恶劣环境下的可靠运行^[9,10]，有望满足多种实际应用场景的需求.

迄今为止，基于 Ga_2O_3 的光电探测器已取得长足进展. 然而，作为一种体半导体材料， Ga_2O_3 虽然具有较高的光吸收率，但在强光-物质相互作用方面仍存在局限^[11]. 为克服这一基本限制，引入另一种互补的光敏材料以构建异质界面成为必然选择^[12]. 通过异质结空间电荷区（SCR）的形成及相关新颖物理机制，该策略能够实现低暗电流（ I_{dark} ）、高响应度（ R ）、快速响应、宽光谱光电探测以及自供电运行^[1]. 其中，空间电荷区的内建电场（ E_{bi} ）对光生电子-空穴对的有效分离起着至关重要的作用. 与传统异质结相比，范德瓦耳斯异质结具有自由堆叠且表面无悬挂键的显著特征，易于通过外场对输出电流进行有效调控. 这为研究异质深紫外光电子学提供了新的契机，满足跨学科交叉发展的需求^[13]. 例如，在已报

道的 MXene/Ga₂O₃ 范德瓦耳斯异质结光电探测器中^[14]，通过打破费米能级钉扎效应，成功降低了接触电阻并减弱了界面态的影响。该异质结展现出 10^9 的超大整流比和极低的暗电流 (10^{-12} A)。此外，基于 Bi/Ga₂O₃ 的范德瓦耳斯异质结光电探测器不仅能有效抑制暗电流^[15]，还同时实现了 0.2 A/W 的响应度和 8.58×10^{11} Jones 的比探测率 (D^*)。由此可见，基于 Ga₂O₃ 的范德瓦耳斯异质结是探究界面载流子动力学与光电子器件物理的理想对象。

考虑到全无机钙钛矿材料具有较长的载流子扩散长度和强烈的光-物质相互作用^[16,17]，本工作构建了 CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 范德瓦耳斯异质结，以深入研究其光电探测特性。所制备的异质结器件展现出优异的光响应特性，实现了高响应度和大外量子效率 (EQE)。此外，本文还对该器件的自供电载流子动力学机制进行了详细探讨。

2 实验

首先，采用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术，在 860 °C 和 100 Torr 腔室气压条件下，在 Al₂O₃ 衬底上生长了 Ga₂O₃ 薄膜。在生长过程中，以纯度为 99.99999% 的金属镓和 99.999% 的氧气作为前驱体，氩气为载气。金属镓被放置于石英舟中，Al₂O₃ 衬底则垂直固定在倾斜的基底托架上。反应腔室抽至真空后，通入流量为 20 SCCM 的氧气，并通过 250 W 的射频源激发产生氧等离子体。随后，在 Ga₂O₃ 薄膜生长完成后，利用耐热胶带掩膜技术^[18]，通过热滴注法 (hot-casting) 将 CsPbIBr₂ 前驱体溶液滴涂于部分掩蔽的 Ga₂O₃ 薄膜表面。将制备好的样品在 220 °C 下退火 5 分钟以挥发溶剂，使前驱体转化为 CsPbIBr₂ 薄膜，从而完成 CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 平面异质结的构建。

本研究针对该异质结的两种材料分别制备了非对称电极，以确保良好的欧姆

接触. 利用机械转移法将 In 电极转移至 Ga_2O_3 薄膜表面, 同时通过磁控溅射技术在 CsPbIBr_2 薄膜表面沉积厚度为 30 nm 的 Au 电极. 经光学显微镜测定, 该光电探测器的有效光照面积 (S) 约为 $9.742 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$.

为评估所制备薄膜的晶体质量, 对其进行了 X 射线衍射 (XRD) 表征. 通过紫外-可见 (UV-Vis) 分光光度计测试了半导体材料的光学吸收特性, 并计算了光学带隙. 最后, 以波长为 254 nm 的深紫外灯作为激发光源, 在室温下利用 Keysight 1505A 半导体参数分析仪对异质结的深紫外光响应特性进行了系统测试.

3 结果与讨论

为了探究所制备薄膜的晶体质量, 我们进行了 XRD 表征. 如图 1(a)所示, 对比标准 JCPDS 卡片(No. 43-1012), 图谱中位于 18.9° 、 38.39° 和 59.08° 处的特征峰对应于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的特定晶面^[19,20]. 此外, 位于 15.22° 和 30.71° 的衍射峰则归属于 CsPbIBr_2 晶相^[21]. 图中 41.8° 处出现的尖锐衍射峰源于所使用的 (0006) 面 Al_2O_3 衬底. 在明确材料的晶体结构后, 通过紫外-可见 (UV-vis) 吸收光谱分析了器件的光学特性. 如图 1(b)所示, 在 200 至 800 nm 的测试范围内, 与纯 Ga_2O_3 (截止波长约为 270 nm) 相比, $\text{CsPbIBr}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结的截止波长红移至 600 nm. 这得益于半导体异质结的“窗口效应”^[1], 所制备的异质结展现出了紫外-可见宽带光电探测的潜力. 需要说明的是, 光谱中 600-800 nm 频段显示的较高吸收本底, 主要是由 CsPbIBr_2 钙钛矿薄膜表面粗糙度引起的光散射所致, 而非异质结的本征光吸收. 依据 Tauc 关系式: $(\alpha h\nu)^2 = C \cdot (h\nu - E_g)^{[22]}$ (其中 α 为吸收系数, $h\nu$ 为入射光子能量, C 为常数), 我们在图 1(c)和(d)中拟合出 Ga_2O_3 和 CsPbIBr_2 的带隙 (E_g) 分别为 4.75 eV 和 2.03 eV, 这与文献报道的结果基本一致^[23,24].

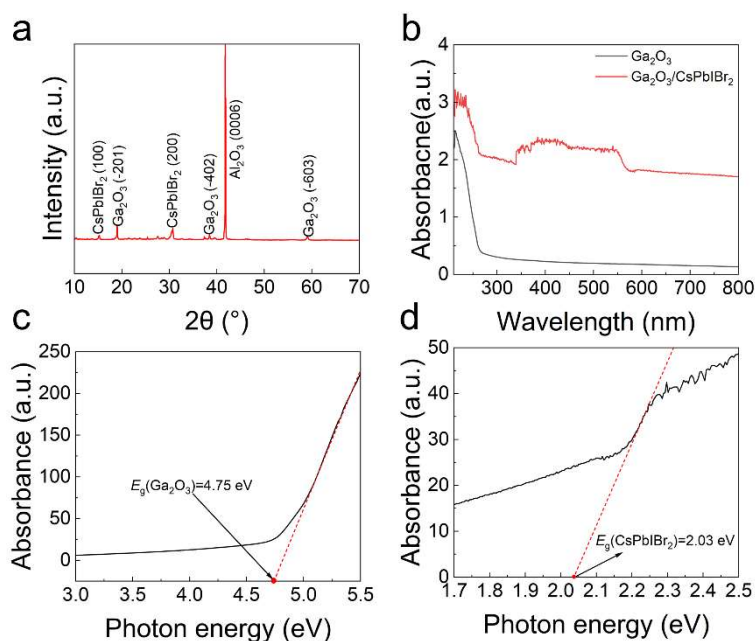


图 1. (a) CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 异质结的 X 射线衍线(XRD)图谱; (b) CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 异质结的紫外-可见吸收光谱; (c) Ga₂O₃ 薄膜和(d) CsPbIBr₂ 薄膜的 Tauc 关系曲线.

Figure 1. (a) XRD pattern of CsPbIBr₂/Ga₂O₃ heterojunction; (b) UV-vis absorbance spectrum of CsPbIBr₂/Ga₂O₃ heterojunction; $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ curves of (c) Ga₂O₃ film and (d) CsPbIBr₂ film.

图 2(a)和(b)的 SEM 图像表明, Ga₂O₃ 和 CsPbIBr₂ 薄膜均具有平整且均匀的表面形貌. 图 2(c)展示了 Ga₂O₃ 上生长 CsPbIBr₂ 薄膜的横截面 SEM 图像, 其中 CsPbIBr₂ 和 Ga₂O₃ 的厚度分别约为 22.52 μm 和 163.88 μm . 由图可知, 两种薄膜间形成了清晰且紧密的异质结界面, 无明显的孔洞或缝隙缺陷. 基于上述材料表征结果, 通过热滴注法成功构建了如图 2(d)所示的 CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 范德瓦耳斯异质结光电探测器^[25]. 图 2(e)描绘了该探测器在黑暗及不同光强照射下的半对数电流-电压 (I-V) 特性曲线. 在 10 V 偏压下, 器件的暗电流密度极低 (仅为 $2.09 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$), 这极大抑制了器件的主要噪声, 为实现高灵敏度光电探测奠定了基础. 值得注意的是, 器件在暗态下的电流最低点与光照下的最低点并不在同一位置, 呈现出电流的零点漂移现象, 这可能是由钙钛矿材料中独特的卤素离子迁移引发的极化效应造成的^[26]. 具体而言, 带负电的卤素离子在外电场驱动下于界面处积聚, 并通过与带正电的卤素空位相互作用, 形成了一个与内建电场 (E_{bi}) 方向相

反的极化电场，从而导致了暗态下的电流最低点发生显著漂移。然而，在光照条件下，大量产生的光生载流子会瞬间屏蔽这一极化场，从而使得光照下的电流最低点重新偏移回零电压附近。当器件受到强度为 $245 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 254 nm 紫外光照射时，在 -10 V 偏压下的光电流密度分别为 -6.16×10^{-8} 、 -1.18×10^{-7} 、 -1.64×10^{-7} 、 -2.12×10^{-7} 和 $-4.43 \times 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$ ；而在 10 V 正偏压下，光电流密度分别达到 9.53×10^{-8} 、 1.89×10^{-7} 、 2.91×10^{-7} 、 3.76×10^{-7} 和 $8.32 \times 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$ 。这一结果证实了异质结具有明显的整流特性。随着光强的增加，开路电压 (V_{oc}) 向负向偏移，最大可达 0.7 V 。这证明了异质界面处的 SCR 已经形成了稳定的 E_{bi} ，为自供电运行提供了坚实的物理基础。此外，器件的明暗电流比 (PDCR) 由式 (1) 计算得出：

$$\text{PDCR} = \frac{I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}}{I_{\text{dark}}} \quad (1)$$

在 10 V 下，PDCR 达到 4.01×10^3 ，明显高于 -10 V 下的 1.39×10^3 ，这是由正反向偏压下不同的载流子传输机制导致的。优异的 PDCR 值表明该异质结探测器具有出色的抗干扰能力。并在此偏压下评估了器件随波长变化的光响应特性，如图 2(f)所示，响应光谱在 254 nm 处展现出最明显光响应峰，证实了该光电探测器优异的日盲紫外选择性探测行为。

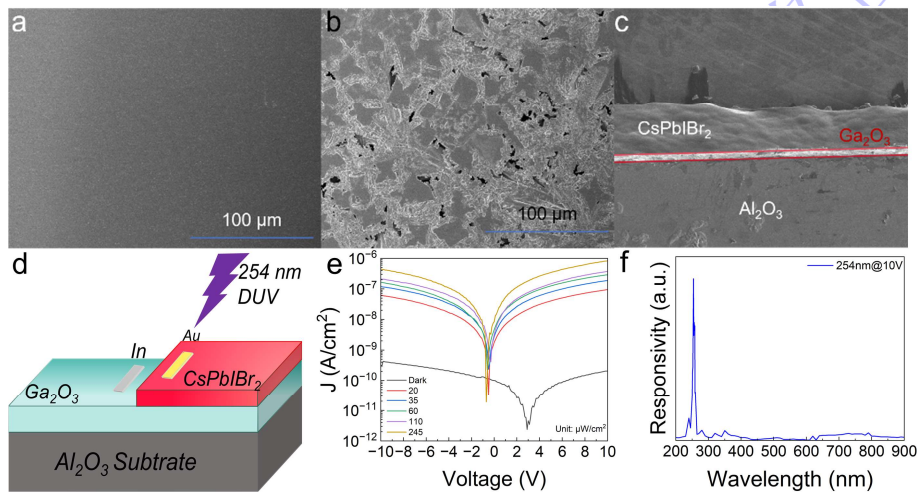


图 2. (a) Ga_2O_3 薄膜与(b) CsPbIBr_2 薄膜的表面 SEM 图像；(c) 在 Ga_2O_3 上制备 CsPbIBr_2 薄膜的截面 SEM 图像；(d) 所制备的 $\text{CsPbIBr}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结紫外光电探测器结构示意图；(e) 探测器在暗条件及不同光强 254 nm 深紫外光照射下的半对数 J-V 特性曲线；(f) $\text{CsPbIBr}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结紫外光电探测器在 10 V 偏压下测得的光谱响应图。

Figure 2. Surface SEM image of the (a) Ga₂O₃ film and the (b) CsPbIBr₂ film; (c) cross-sectional SEM images of the Ga₂O₃ film with the growth of the CsPbIBr₂ film; (d) schematic illustration of the fabricated CsPbIBr₂/Ga₂O₃ heterojunction UV photodetector; (e) the semi-log J-V curves of the photodetector in the dark and under 254 nm DUV illumination with various light intensities; (f) spectral responsivity of the CsPbIBr₂/Ga₂O₃ heterojunction UV photodetector measured under a 10 V bias.

得益于界面处稳固的内建电场 (E_{bi}), 该异质结探测器在零偏压下即可对 254 nm 紫外光产生明显响应, 证明了其自供电工作特性. 光生电子-空穴对在内建电场的作用下被有效分离, 随后在界面沟道中传输, 最终通过外电路输出电流. 图 3(a)展示了器件在零偏压下的随时间变化的瞬态光电流密度 ($J-t$) 响应曲线; 在不同光强的周期性照射下, 探测器表现出极其稳定且可重复的开关响应行为. 图 3(b)和(c)分别给出了不同偏压和不同光强下的 $J-t$ 性能. 在给定偏压下, 随着光强的增加, 光电流随之增大, 因为更多的价带 (E_v) 电子被激发跃迁至导带 (E_c). 而在给定光强下, 随着外加电场的增强, 光生载流子的分离与传输效率得到提升, 从而产生更大的光电流. 为了进一步揭示载流子动力学机制, 我们采用双指数衰减模型对器件的响应速度进行了拟合分析 $I = I_0 + Ae^{-t/\tau_1} + Be^{-t/\tau_2}$ [6]. 其中, I_0 为稳态光电流, A 和 B 为常数, τ_1 和 τ_2 分别代表快速和慢速弛豫时间, τ_r 和 τ_d 分别代表上升沿和下降沿的响应时间. 具体而言, 该探测器在 0、5 和 -5 V 下的响应时间如图 3(d)-(f)所示. 在 0 V 下的 τ_r 为 0.53 s 和 3.4 s; 5 V 下为 0.6 s 和 3.64 s; -5 V 下为 0.95 s 和 5.42 s. 同时, 0 V 下的 τ_d 分别为 0.33 s 和 3.11 s; 5 V 下为 2.12 s 和 0.25 s; -5 V 下为 0.78 s 和 12.39 s. 外加偏压下响应速度变慢的现象, 可归因于持续光电导效应 (Persistent Photoconductivity), 即在大偏压下大量电荷载流子被深能级缺陷所捕获及缓慢释放的过程.

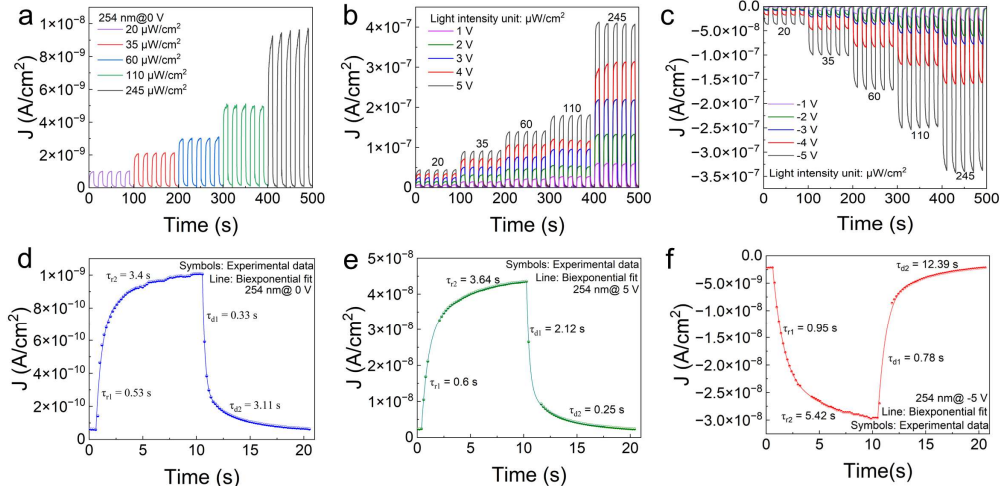


图 3. CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 异质结光电探测器在不同光强照射下, (a) 0 V、(b) 5 V 和(c)-5 V 偏压下的 J-t 特性曲线; 在 20 μW/cm² 光强照射下, (d) 0 V、(e)5 V 和(f)-5 V 偏压下的响应时间. **Figure 3.** The J-t performances of the CsPbIBr₂/Ga₂O₃ heterojunction UV photodetector at (a) 0 V, (b) 5 V and (c) -5 V biases under illuminations with various light intensities. The response time at (d) 0 V, (e) 5 V and (f) -5 V biases under light illumination with an intensity of 20 μW/cm².

为深入理解该探测器内部的载流子传输机制, 依据安德森法则 (Anderson's rule) [27], 我们绘制了图 4 所示的能带结构图. 如图 4(a)所示, 导带偏移量 (ΔE_c) 由 CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 之间的电子亲和能 (χ) 差值决定, 而价带偏移量 (ΔE_v) 则基于 E_g 和 ΔE_c 计算求得. 文献报道指出, CsPbIBr₂ 和 Ga₂O₃ 的电子亲和能分别为 4.0 eV 和 3.32 eV^[21,28]. 据此计算, ΔE_c 和 ΔE_v 分别为 0.68 eV 和 2.90 eV, 呈现典型的 II 型 (Type-II) 能带排列. 如图 4(b)所示, 当两种材料接触时, 受费米能级 (E_f) 不连续性的驱动, 电子自 Ga₂O₃ 侧向 CsPbIBr₂ 侧扩散; 同时空穴由 CsPbIBr₂ 侧向 Ga₂O₃ 侧扩散, 直至系统达到热平衡以至费米能级被拉平. 这一过程在界面空间电荷区建立了一个从 Ga₂O₃ 指向 CsPbIBr₂ 的 E_{bi} . 在 0 V 偏压下, 当 254 nm 紫外光照射时 (光子能量均大于两者的带隙), CsPbIBr₂ 和 Ga₂O₃ 层均会激发产生光生电子-空穴对, 并在内建电场的作用下实现高效的空间分离. 最终, 分离后的载流子被两端电极收集, 从而实现了无需外界电源驱动的自供电探测.

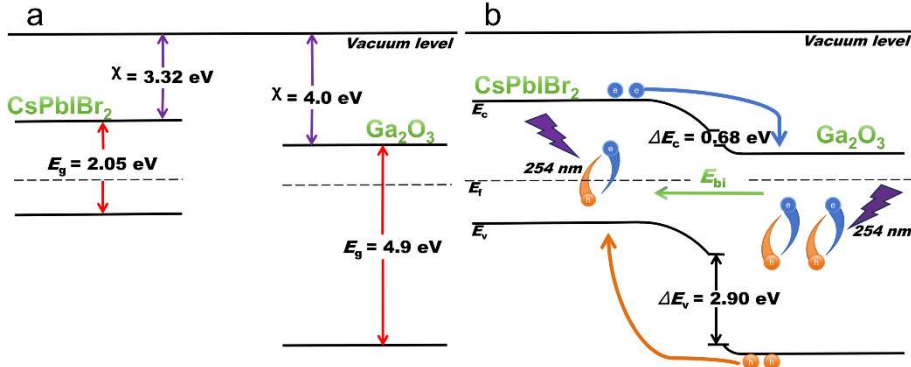


图 4. (a) Ga₂O₃ 和 CsPbIBr₂ 半导体接触前的能带结构图；(b) 0 V 偏压下 CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 异质结的载流子传输机制。

Figure 4. (a) Energy band structure diagram of Ga₂O₃ and CsPbIBr₂ semiconductors before contact; (b) carrier transport mechanism of the CsPbIBr₂/Ga₂O₃ heterojunction at 0 V bias.

为了探究界面复合机制，我们在图 5(a)和(c)中利用幂律关系： $I_{phot} = AP^{\theta}$ ^[29] 绘制了光电流与光强的拟合曲线（其中 A 为常数， θ 为指数）。结果表明，在不同偏压下， θ 介于 0.62 至 0.667 之间，表明光电流与光强呈现明显的次线性关系。这说明异质结界面处不可避免地存在一定程度的界面态和缺陷。值得注意的是， θ 值随外加偏压的增大而增大；这是因为较高的偏压赋予了光生电子更快的漂移速率，使得电子在被缺陷完全捕获前有更高的概率抵达并被电极收集。

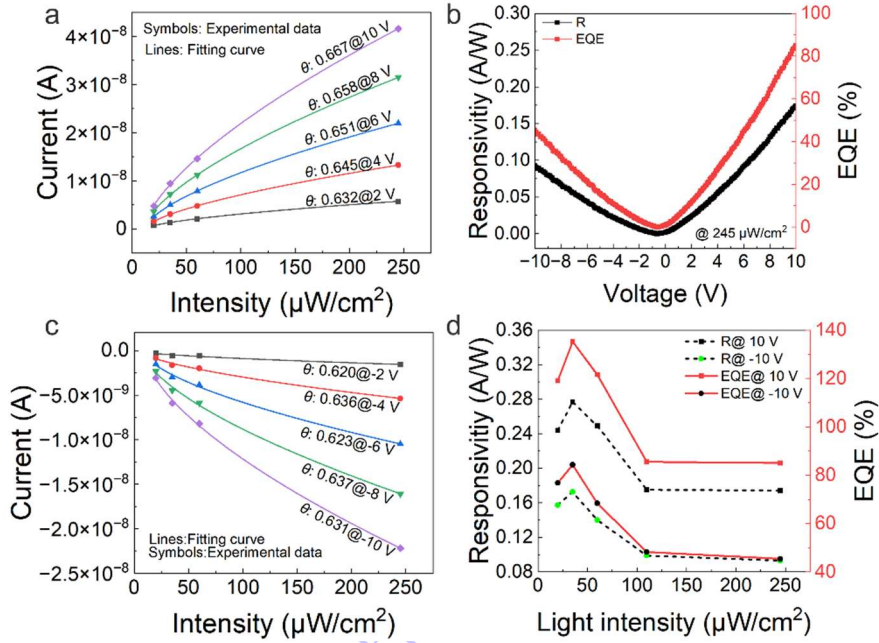


图 5. (a)正向和(c)反向偏压下光电流随光强的变化关系；(b)偏压和(d)光强对 R 与 EQE 的依赖关系。

Figure 5. Light intensity-dependent photo current under forward (a) and reverse (c) biases. Voltage

and light intensity dependence of R and EQE in (b) and (d).

为了定量评估 CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 异质结的性能，我们计算了 R 、 D^* 和EQE等核心指标，具体公式如下 [6]:

$$R = \frac{I_{photo} - I_{dark}}{P \cdot S}, \quad (2)$$

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

$$EQE = \frac{hc}{e\lambda}, \quad (4)$$

式中， P 为入射光强， S 为有效光照面积 ($9.742 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$)， h 为普朗克常数， e 为元电荷量， c 为光速， λ 为入射光波长 (254 nm)，其中暗电流被视为主要噪声源. 如图 5(b) 所示，在 $245 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光强下， R 和EQE随偏压的增大而显著提升. 在 -10 V 和 10 V 时， R 分别达到 0.09 A/W 和 0.17 A/W，对应的EQE为 45% 和 85%. 这是由于大偏压带来的高载流子漂移速率有效降低了复合几率. 而在图 5(d) 中，随着光强的增加， R 和EQE呈现下降趋势. 这是因为强光激发产生了高密度的载流子，大量电子和空穴在抵达电极前发生了严重的复合，从而降低了电荷的收集效率. 此外，在 -10 V 和 10 V 偏压下，器件的比探测率 D^* 分别高达 1.28×10^{12} Jones 和 2.98×10^{12} Jones，彰显了该异质结器件对极微弱光信号的高灵敏探测能力. 为进一步评估器件的光响应稳定性和可重现性，在 5 V 偏压和不同 254 nm 光强下进行了瞬态光电流密度测试，如图 6 所示，器件在所有光强下均展示出优异循环性能，并在明暗态之间具有稳定且优良可重现的电流开关性能.

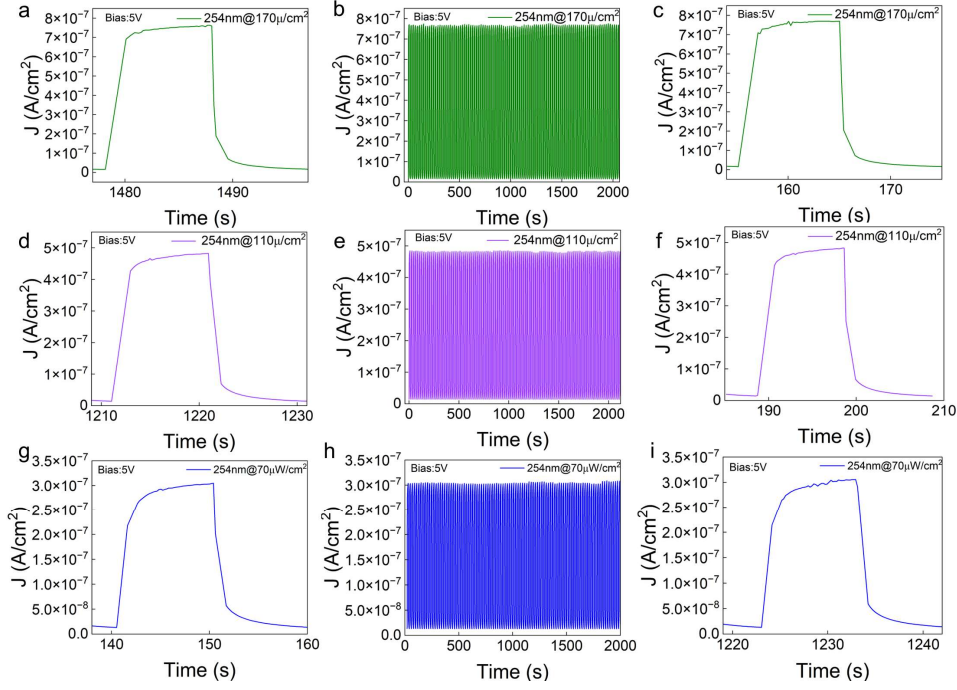


图 6. CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 异质结光电探测器在 5 V 偏压和 254 nm 周期光照下，测得的 (a-c) 170 μW/cm²、(d-f) 110 μW/cm² 及(g-i) 70 μW/cm² 光功率密度下的 J-t 特性循环曲线。

Figure 6. Transient J-t characteristic curves of the CsPbIBr₂/Ga₂O₃ heterojunction UV photodetector measured under 5 V bias and periodic 254 nm illumination at optical power densities of (a–c) 170 μW/cm², (d–f) 110 μW/cm², and (g–i) 70 μW/cm².

表 1 总结了近年来报道的代表性 Ga₂O₃ 基异质结光电探测器的性能指标。

对比可知，本工作所制备的 CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 异质结探测器在各项关键光电参数上

均表现出卓越的竞争力。

表 1. 近年氧化镓异质结探测器性能总结

Table 1. Summary of UV photodetectors based on Ga₂O₃-based heterojunctions.

Layout	Wavelength (nm)	Voltage (V)	R (A/W)	D^* (Jones)	EQE (%)	Refs
Cs ₃ Cu ₂ I ₅ /β-Ga ₂ O ₃	265 nm	0V	2.3×10^{-3}	2.4×10^8	\	[30]
CsCu ₂ I ₃ /β-Ga ₂ O ₃	254 nm	10V	2×10^{-2}	1×10^7	10	[13]
α-Sb ₂ O ₅ /α-Ga ₂ O ₃	287 nm	0V	7.1×10^{-4}	\	\	[31]
Diamond/β-Ga ₂ O ₃	244 nm	0V	2×10^{-4}	6.9×10^9	\	[32]
NiO/β-Ga ₂ O ₃	254 nm	0V	5.7×10^{-5}	5.45×10^9	\	[33]
GaSe/β-Ga ₂ O ₃	254 nm	0V	1.49×10^{-3}	6.65×10^{11}	\	[34]
CuCrO ₂ /β-Ga ₂ O ₃	254 nm	0V	1.2×10^{-4}	4.6×10^{11}	\	[35]
CsPbIBr ₂ /β-Ga ₂ O ₃	254 nm	0V	2×10^{-3}	4.35×10^{10}	0.86	This work
CsPbIBr ₂ /β-Ga ₂ O ₃	254 nm	10V	1.7×10^{-1}	2.98×10^{12}	85	This work

4 结 论

本文通过结合等离子体增强化学气相沉积（PECVD）与热滴注（hot-casting）工艺，成功制备了具备自供电特性的 CsPbIBr₂/Ga₂O₃ 范德瓦耳斯异质结日盲深紫外光电探测器。结构表征证实了异质结具有高纯度的物相和良好的晶体质量。能带分析表明该器件具有典型的 II 型能带排列以及稳固的界面内建电场，从而赋予了器件在零偏压下的自供电探测功能。该探测器具有极低的暗电流密度（ 2.09×10^{-10} A/cm²）和高达 4.01×10^3 的明暗电流比。在 10 V 正偏压下，器件展现出优异的综合性能：响应度达到 0.17 A/W，外量子效率高达 85%，比探测率突破 2.98×10^{12} Jones。与已报道的同类 Ga₂O₃ 基探测器相比，本器件不仅具备自供电性能，还兼具宽带的光谱响应，为研发下一代高性能深紫外传感系统提供了一种切实可行的新策略。

参考文献

- [1] Liu Z, Xi Z, Gu L, Yan S, Li L, Shu L, Zhang J, Zhang S, Bian A, Jiang M, Tang W 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** e01855
- [2] Zubair M, Xu Y, Wang Y, Jiang X, Miao J, Hao S, Tian B, Chu J, Duan C 2025 *InfoMat* **7** e70028
- [3] Wu J, Zhang J, Jiang R, Wu H, Chen S, Zhang X, Wang W, Yu Y, Fu Q, Lin R, Cui R, Zhou T, Hu Z, Wan D, Chen X, Hu W, Liu H, Lu J, Ni Z 2025 *Nat. Commun.* **16** 564
- [4] Cao F, Liu Y, Liu M, Han Z, Xu X, Fan Q, Sun B 2024 *Research* **7** 0385
- [5] He X, Sun R, Xu X, Geng H, Qi S, Zhang K H, Long H 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 64146
- [6] Liu Z, Tang W 2023 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56** 093002
- [7] 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

- [8] Liu Z, Xi Z, Gu L, Yan S, Zhang R, Zhang X, Wang H, Zhang J H, Tang W 2025 *Nanotechnology* **36** 362001
- [9] Wu G, Guo X, Zhang F, Zhong X, Wang J, Guo D 2025 *IEEE Electron Device Lett.* **46** 2086
- [10] Liang H, Tang X, Shao H, Zhu R, Deng S, Zhan X, Zhu T, Wang J, Zhang J, Zhang G, Mei Z 2024 *Adv. Sci.* **11** 2410761
- [11] 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, Gao L, Gan X, Wang X 2025 *Sci. Adv.* **11** eadw3969
- [12] Zhang D, Zheng W, Lin R, Li Y, Huang F 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1900935
- [13] Gao A, Jiang W, Ma G, Liu Z, Li S, Yan Z, Sun W, Zhang S, Tang W 2022 *Curr. Appl. Phys.* **33** 20
- [14] Li L, Yao S, Wang Y, Meng X, Zhang J H, Zhang S, Huang J, Guo D, Li S, Ji X, Tang W, Liu Z 2025 *Laser Photonics Rev.* **20** e02467
- [15] Xu Z, Dong D, Peng M, Cheng T, Zhang F, Yang Z, Wu Z 2025 *Chin. Opt. Lett.* **23** 071601
- [16] Stranks S D, Eperon G E, Grancini G, Menelaou C, Alcocer M J P, Leijtens T, Herz L M, Petrozza A, Snaith H J 2013 *Science* **342** 341
- [17] Maimaitizi H, Agren H, Chen G 2026 *Light Sci. Appl.* **15** 135
- [18] Qi X H, Liu Z, Ji X Q, Yue J Y, Zhi Y S, Li S, Yan Z Y, Guo Y F, Tang W H 2023 *IEEE Sens. J.* **23** 2055
- [19] Tang X, Zhao Y, Li K H, Liu C, Faber H, Babatain W, Liao C H, Yuvaraja S, Khandelwal V, Chettri D, Cao H, Lu Y, Wang C, Anthopoulos T D, Zhang X, Li X 2024 *Adv. Electron. Mater.* **11** 2400046
- [20] Liu Z, Wang X, Liu Y, Guo D, Li S, Yan Z, Tan C K, Li W, Li P, Tang W 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 13920

- [21] Lin J, Lai M, Dou L, Kley C S, Chen H, Peng F, Sun J, Lu D, Hawks S A, Xie C, Cui F, Alivisatos A P, Limmer D T, Yang P 2018 *Nat. Mater.* **17** 261
- [22] Zhong H, Pan F, Yue S, Qin C, Hadjiev V, Tian F, Liu X, Lin F, Wang Z, Bao J 2023 *J. Phys. Chem. Lett.* **14** 6702
- [23] Gao B, Meng J 2020 *ACS Appl. Energy Mater.* **3** 8249
- [24] Wu H, Zhang T, Shen L, Liu Y, Wang F, Lu J, Lu B, Pan X, Ye Z 2022 *Adv. Mater. Interfaces* **9** 2200851
- [25] Yan Z Y, Li S, Liu Z, Liu W J, Qiao F, Li P G, Tang X, Li X H, Yue J Y, Guo Y F, Tang W H 2022 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **28** 3803208
- [26] Dong L, Pang T, Yu J, Wang Y, Zhu W, Zheng H, Yu J, Jia R, Chen Z 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 14205
- [27] Liu Z, Liu Y, Wang X, Li W, Zhi Y, Wang X, Li P, Tang W 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 045707
- [28] Mohamed M, Irmischer K, Janowitz C, Galazka Z, Manzke R, Fornari R 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 132106
- [29] Ma W, Shu L, Zhang X, Guo P, Yan X, Wan P, Liu Z, Kan C, Shi D, Jiang M 2026 *Chip* **5** 100190
- [30] Ma J, Xia X, Yan S, Li Y, Liang W, Yan J, Chen X, Wu D, Li X, Shi Z 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 15409
- [31] Wu C, Lv P, Zhu Z, Huang Y, Tu C, Chen G, Lakshminarayana G, Wang Y 2026 *Mater. Horiz.* **13** 454
- [32] Chen Y C, Lu Y J, Lin C N, Tian Y Z, Gao C J, Dong L, Shan C X 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 5727
- [33] Wang Y, Wu C, Guo D, Li P, Wang S, Liu A, Li C, Wu F, Tang W 2020 *ACS Appl. Electron. Mater.* **2** 2032
- [34] Su R, Xi Z Y, Li S, Zhang J H, Jiang M M, Liu Z, Tang W H 2024 *Acta Phys. Sin.*

73 118502 (in Chinese) [宿冉, 奚昭颖, 李山, 张嘉汉, 姜明明, 刘增, 唐为华

2024 物理学报 73 118502]

[35] Wu C, Qiu L, Li S, Guo D, Li P, Wang S, Du P, Chen Z, Liu A, Wang X, Wu H,

Wu F, Tang W 2021 *Mater. Today Phys.* **17** 100335

Self-powered CsPbIBr₂/Ga₂O₃ van der Waals heterojunction with high responsivity and large external quantum efficiency*

MENG Xiangxi¹⁾ MA Lujin¹⁾ CHEN Weiming¹⁾²⁾ WANG Xinrui¹⁾ YAN Zuyong³⁾

ZHANG Jia-Han¹⁾⁴⁾⁵⁾† ZHANG Shaohui⁶⁾ LIU Zeng¹⁾⁵⁾†

1) (School of Electronic Information Engineering, Electronic-Photonic Smart Sensing Device

R&D Team, Inner Mongolia University, Hohhot, 010021, China)

2) (Transportation Institute of Inner Mongolia University, Hohhot, 010021, China)

3) (School of Microelectronics Industry-education Integration, State Key Laboratory of

Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of

Technology, Lanzhou 730050, China)

4) (Inner Mongolia BKJD Robot Co., Ltd., Baotou, 014020, China)

5) (Inner Mongolia Key Laboratory of Intelligent Communication and Sensing and Signal

Processing, Inner Mongolia University, Hohhot, 010021, China)

6) (Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Electronic Instruments and Materials,

Institute of Biological and Medical Engineering, Guangdong Academy of Sciences,

Guangzhou, 510316, China)

Abstract

In this work, a self-powered deep ultraviolet photodetector is introduced based on a CsPbIBr₂/Ga₂O₃ van der Waals heterojunction, fabricated via PECVD and hot-casting methods. The crystalline structure and sharp interface were comprehensively verified using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), showing a smooth, defect-reduced

heterojunction profile with film thicknesses of $\sim 22.52\ \mu\text{m}$ for CsPbIBr_2 and $\sim 163.88\ \mu\text{m}$ for Ga_2O_3 . Tauc plots verify bandgaps of 4.75 eV for Ga_2O_3 and 2.03 eV for CsPbIBr_2 . According to Anderson's rule, the $\text{CsPbIBr}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ heterojunction forms a typical Type-II band alignment with conduction and valence band offsets of 0.68 eV (ΔE_c) and 2.90 eV (ΔE_v), which creates a robust built-in electric field across the space charge region to drive efficient photogenerated charge separation. The device delivers ultralow dark current of $1.045 \times 10^{-11}\ \text{A}$ at 10 V and a high photo-to-dark current ratio of 4.01×10^3 . Benefiting from the intrinsic built-in potential, stable repeatable photoresponse is realized at zero bias, demonstrating self-powered detection capability. At 10 V bias, the detector achieves a high responsivity of 0.17 A/W, an external quantum efficiency of 85% and an ultrahigh specific detectivity of 2.98×10^{12} Jones under 254 nm illumination. Furthermore, transient photoresponse measurements demonstrate rapid response performance at zero bias, characterized by rising and decaying processes of 0.53 s and 0.33 s, respectively. In all, this work offers a facile strategy for high-performance self-powered solar-blind UV photodetection.

Keywords: Gallium oxide, perovskite, heterojunction, photodetector, self-power

* Project supported by This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62564011, 62204125 and 62501320), the Young Scientists Fund (Type A) of the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region of China (Grant No. 2026QA016), the Basic Scientific Research Funding for Universities Directly Affiliated with the Inner Mongolia Autonomous Region of China (Grant No. 2026JBKY002), Natural Science Foundation of Gansu province of China (Grant No. 25JRRA087), the Stead Plan of Inner Mongolia University for Introducing High-Level Talents (Grant Nos. 10000-A24199006 and 10000-A24106015), the Inner Mongolia Autonomous Region-level Scientific Research Startup Fund (Grant Nos. 21700-252904 and 21700-252905), the Inner Mongolia University Experimental Technology Research Project in 2026 (Self-Made and Modified Equipment Project) (Grant No. SYJS2026007), Youth Science and Technology Talent Innovation Program of Lanzhou City (Grant No. 2025-QN-080), the Hongliu Outstanding Young Talents Funding Scheme of Lanzhou University of Technology.

† Corresponding author. E-mail: jiahan_zhang@outlook.com, shzhang2016@sinano.cc.cn, zengliu@imu.edu.cn

The first author. E-mail: 32556090@mail.imu.edu.cn