

# 基于 GaSe/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质结的自供电 日盲紫外光电探测器\*

宿冉<sup>1)</sup> 奚昭颖<sup>1)</sup> 李山<sup>1)</sup> 张嘉汉<sup>2)3)</sup> 姜明明<sup>4)</sup> 刘增<sup>2)†</sup> 唐为华<sup>1)‡</sup>

1) (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)

2) (内蒙古大学电子信息工程学院, 呼和浩特 010021)

3) (南京大学电子科学与工程学院, 南京 210093)

4) (南京航空航天大学物理学院, 空天信息材料与物理工信部重点实验室, 南京 211106)

(2024年2月16日收到; 2024年4月14日收到修改稿)

氧化镓(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)作为超宽禁带半导体在深紫外探测领域有极其重要的应用价值. 它能与GaSe形成典型的II型异质结构, 促进载流子分离与传输, 进而实现高性能的自供电探测. 本文利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术在蓝宝石衬底上生长了Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜, 并采用布里奇曼技术在氧化镓薄膜上生长了GaSe薄膜, 构建了GaSe/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>异质结光电探测器, 分析其中涉及的光物理与界面物理问题. 该探测器对深紫外光有很好的响应性能, 在8 V的电压下器件的暗电流仅为1.83 pA, 254 nm光照下的光电流达到了6.5 nA, 且UV-C/可见光(254 nm/600 nm)的抑制比约为354, 即使在很小的光照强度下, 响应度和探测度也达到了1.49 mA/W和 $6.65 \times 10^{11}$  Jones. 同时, 由于结界面上的空间电荷区形成的光伏效应, 该探测器在零偏压下表现出自供电性能, 开路电压为0.2 V. 此外, 探测器有很好的灵敏度, 无论是在电压恒定的条件下用不同光强的光照射探测器, 还是在光强恒定条件下改变电压, 器件都能快速响应.

**关键词:** 光电探测器, 氧化镓, 硒化镓, 自供电

**PACS:** 85.60.Gz, 52.70.Kz

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240267

## 1 引言

深紫外(DUV)光电探测器<sup>[1,2]</sup>因其在火焰探测空间通信、导弹追踪和臭氧洞紫外线辐射监测等关键领域的应用引起了研究人员的广泛关注<sup>[3,4]</sup>. 在目前存在的几种日盲光电探测器类型中, 异质结表现出低暗电流、高光电流、高灵敏度和快速响应速度的特点<sup>[5-9]</sup>, 且在p-n结界面处会形成空间电荷区, 存在内置电场( $E_{\text{built-in}}$ ), 有助于电子-空穴对

的分离, 从而使器件能够在没有外部偏压的情况下自供电运行, 满足当今环境友好发展的社会要求.

氧化镓(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)作为一种典型的宽禁带氧化物半导体( $E_g \approx 4.9$  eV)<sup>[10]</sup>, 在日盲光电探测器的制造中有极其重要的地位, 具有高击穿场强和强大的热/化学稳定性, 与以Si, SiC, GaN等为衬底的代表性光电器件相比有卓越的竞争力, 被用于组装肖特基光电二极管、场效应晶体管、日盲光电探测器等光电器件. 目前为止, 已经对基于Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的光电探测器进行了大量的研究和改进工作. 例如Liu等<sup>[11]</sup>

\* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 62204125, 62305171)、国家重点研发计划(批准号: 2022YFB3605404)和国家自然科学基金联合基金(批准号: U23A20349)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zengliu\_inu@163.com

‡ 通信作者. E-mail: whtang@njupt.edu.cn

构建的横向双模式 (光电导模式和耗尽模式) Ni/SiO<sub>2</sub>/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti MOS 结构光电二极管实现了 10<sup>13</sup> Jones 的高比探测率 ( $D^*$ )、高响应度和高外量子效率. 然而, 由于非故意的氧空位诱导的自补偿, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中的 p 型掺杂仍然是一个挑战<sup>[12-14]</sup>, 氧化镓有必要与其他材料结合形成异质结来弥补这一缺陷, 对此很多学者展开了研究. Lu 等<sup>[15]</sup> 构建的 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> 异质结验证了在立方体衬底上实现高质量生长外延 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的可能性. Han 等<sup>[16]</sup> 通过构建 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/a-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si 异质结实现了高灵敏度自供电全光谱探测, 在 200—850 nm 范围内具有高灵敏度, 且具有卓越的稳定性和成像能力. 制备工艺简单以及光电探测性能良好的特性让 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在光电器件制造中占据重要地位.

层状硒化镓 (GaSe) 作为 III-VI 族重要成员是一种重要的二元半导体, 它具有各向异性、较宽的带隙、良好的光学和电学性质等特性<sup>[17]</sup>, 在太阳能电池、光探测器及集成光电子器件等领域有很好的应用前景. 与传统三维材料 (3D) 相比, 这种二维材料 (2D) 有重量轻、灵活性好、稳定性高等优点, 因此得到了研究人员的青睐. 目前在 GaSe 的生长领域, 研究人员已经通过各种生长技术在不同的衬底温度基础上生长出不同类型的硒化镓. 在已发表的报道中通过高温溅射技术制备的多晶硒化镓薄膜实现了电子直接和间接跃迁<sup>[18]</sup>. 在 GaSe 的应用领域, GaSe 是一种典型的 p 型半导体<sup>[19]</sup>, 与很多 n 型半导体能形成 II 型异质结构, 促进载流子分离与传输. 例如 Yuan 等<sup>[20]</sup> 通过分子束外延 (MBE) 方法在硅片上沉积 GaSe 形成了垂直范德瓦耳斯异质结构, 用作光电二极管实现了高效快速的光响应. Ben 等<sup>[21]</sup> 通过范德瓦耳斯外延在石墨烯上合成 GaSe 原子层, 实现了异质结构的强电荷转移. GaSe 是开发新光学与光电器件的理想材料.

本文展示了基于 GaSe/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质结的自供电光电探测器, 该异质结是用布里奇曼法将硒化

镓均匀地生长在氧化镓表面上, 其中氧化镓薄膜是通过等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 生长的. 在 254 nm 的光照下, 其在 8 V 的偏压下表现出 1.83 pA 的低暗电流和 3.5×10<sup>3</sup> 的高光暗电流比 (PDCR), 即使在很小的光照强度下该光电探测器也表现出 6.65×10<sup>11</sup> Jones 的超高比探测率 ( $D^*$ )、1.49 mA/W 的大响应度 ( $R$ )、0.11 s 的上升时间 ( $\tau_r$ ) 和 0.13 s 的衰减时间 ( $\tau_d$ ). 说明该探测器具有快速响应的能力. 该探测器的开路电压为 0.2 V, 说明了其本质上具备自供电特性. 值得一提的是, 器件对不同光强和电压都有很好的灵敏度. 优异的自供电性能、低成本、易于制造的 GaSe/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质结光电探测器为日盲紫外探测提供了一种可能.

## 2 实验方法

利用 PECVD 技术在蓝宝石衬底上生长了 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 外延薄膜, 使用金属镓 (Ga, 99.9999%) 和氧气 (O<sub>2</sub>, 99.9999%) 作为 Ga 源和 O 源, 氩气 (Ar) 作为载气. 薄膜生长温度设定为 860 °C, 压力为 100 Torr (1 Torr ≈ 133.32 Pa), 薄膜生长速率约为 1 μm/h. 采用布里奇曼技术<sup>[22]</sup> 制备 GaSe 薄膜, 生长系统如图 1(a) 所示, 将硒化镓研磨成粉末作为蒸发源置于高温区 (960 °C), 将用上述方法生长的氧化镓薄膜用蓝宝石覆盖一半置于低温区 (300 °C), 使 GaSe 薄膜只沉积在一半的薄膜表面, 两温区之间相隔 15 cm, Ar 作为载气用于将 GaSe 蒸气输送到氧化镓和蓝宝石衬底表面. 升温 40 min 到达设定温度后持续 35 min, 然后冷却至室温. 注意整个生长过程要在真空条件下, 以保证前体不被氧化. 生长得到的 GaSe/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光电探测器结构如图 1(b) 所示. 用 X 射线衍射仪 (XRD) 研究样品的晶体结构, 用场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM, 日立 Regulus 8220) 分别对 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 GaSe 所得样品表面和断面进行了表征, 用 Q-6 紫外-可见 (UV-Vis) 分光

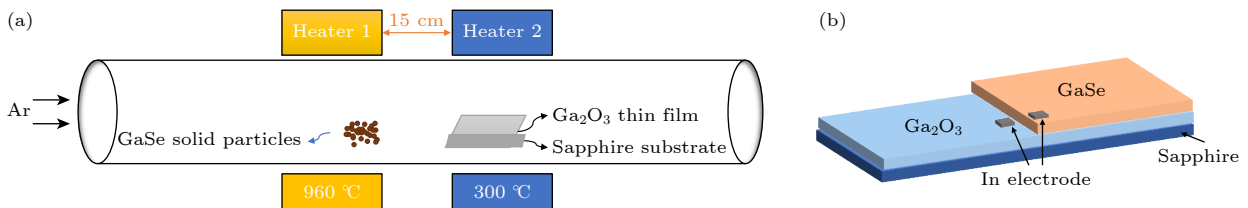


图 1 (a) 实验装置示意图; (b) GaSe/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质结光电探测器示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the experimental setup; (b) schematic diagram of the GaSe/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction photodetector.

光度计测量样品的光谱吸收特性<sup>[23]</sup>, 从而计算出光学带隙. 用 X 射线衍射仪 (XRD) 研究样品的晶体结构, 用场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM, 日立 Regulus 8220) 分别对  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和 GaSe 所得样品表面和断面进行了表征, 用 Q-6 紫外-可见 (UV-Vis) 分光光度计测量样品的光谱吸收特性<sup>[23]</sup>, 从而计算出光学带隙.

分别在  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和 GaSe 表面压上直径为 1 mm 的金属 In 作为异质结的电极, 两电极间距为 0.1 mm, 为进行比较, 分别在蓝宝石基底上制备了单个 In- $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -In 和 In-GaSe-In 器件. 用 keysight B1505 A 和探针台进行电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 和瞬态光电流响应 ( $I$ - $t$ ) 测量. 用波长为 254 和 365 nm 的低压汞灯作为紫外光源, 通过改变光源与样品的距离来控制光强, 以研究探测器的性能<sup>[24]</sup>.

### 3 结果分析

为了研究晶体的生长情况, 图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了 GaSe 薄膜和  $\text{GaSe}/\text{Ga}_2\text{O}_3$  异质结的 XRD 图, 图像显示出明显的晶态的 GaSe, 表明此方法制备的 GaSe 薄膜结晶性较好. XRD 图的  $18.95^\circ$ ,  $38.22^\circ$  和  $58.98^\circ$  处的衍射峰对应于  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜晶体结构的  $(-201)$ ,  $(-402)$  和  $(-603)$  晶面, 表明氧化镓薄膜是  $\beta$  相的<sup>[25]</sup>; 同样地,  $11.107^\circ$ ,  $22.32^\circ$ ,  $45.63^\circ$ ,  $57.79^\circ$ ,  $70.88^\circ$ ,  $80.068^\circ$  和  $85.060^\circ$  处的衍射峰分别对应 GaSe 晶体的  $(002)$ ,  $(004)$ ,  $(008)$ ,  $(0010)$ ,  $(0012)$ ,  $(213)$  和  $(2010)$  平面, 表明 GaSe 为  $\beta$  相<sup>[26]</sup>. 在相同条件下测试了单独  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和 GaSe 分别沉积在蓝宝石上的表面形貌, 结果如图 2(c) 和图 2(d) 所示, 可以看出两个样品表面均匀. 图 2(e) 和图 2(f)

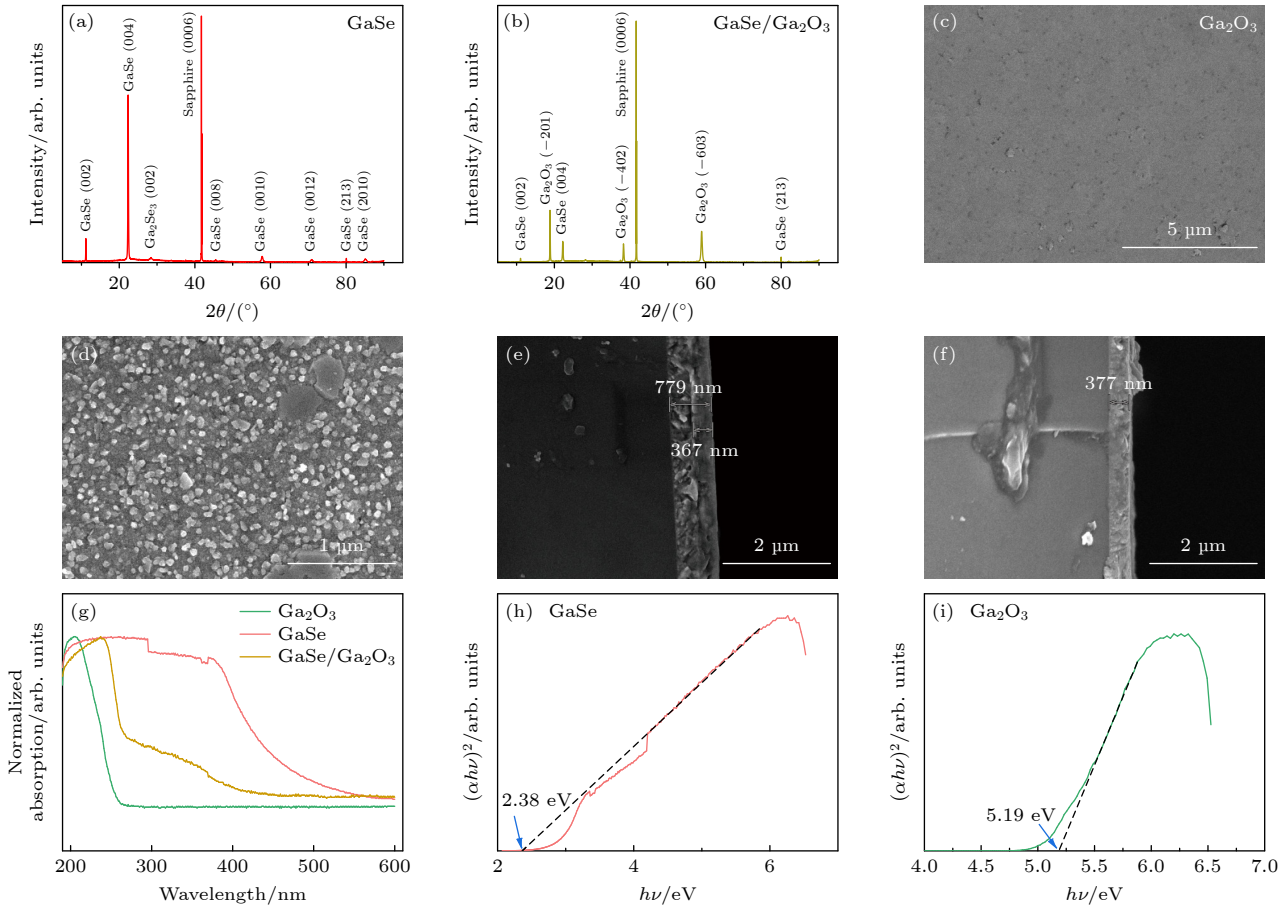


图 2 (a) GaSe 薄膜 XRD 图; (b)  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜 XRD 图; (c)  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜表面 SEM 图; (d) GaSe 表面 SEM 图; (e)  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  上生长 GaSe 的断面 SEM 图; (f) 蓝宝石上生长  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  而未生长 GaSe 的断面 SEM 图; (g) GaSe,  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜和  $\text{GaSe}/\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  异质结的吸收光谱曲线图; (h) GaSe 薄膜的  $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$  曲线图; (i)  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的  $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$  曲线图

Fig. 2. (a) XRD of GaSe films; (b) XRD of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films; (c) SEM images of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films; (d) SEM images of GaSe surfaces; (e) cross-sectional SEM images of GaSe grown on  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ; (f) cross-sectional SEM images of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  grown without GaSe on sapphire; (g) absorption spectra of GaSe,  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films and  $\text{GaSe}/\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  heterojunctions; (h)  $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$  curves of GaSe films; (i)  $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$  curves of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films.

分别为 GaSe 生长侧和未生长侧的断面 SEM 图像, 在整个堆叠结构中, 蓝宝石衬底、氧化镓层和硒化镓层之间的分层特征明显, 且氧化镓厚度为 377 nm, 硒化镓的生长厚度约为 367 nm. 为了了解 GaSe/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> p-n 结处的能带排列, 有必要知道两种材料的带隙精确值. 如图 2(g), 分别测量了 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜、GaSe 薄膜、GaSe/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质结的吸收光谱 (190—600 nm). 很明显异质结的形成拓宽了材料的吸收光波段范围, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜显示了位于 263 nm 的吸收边, 而 GaSe 在紫外和可见光范围内都可以吸收. 根据 Tauc 原理<sup>[27]</sup>, 即  $(\alpha h\nu)^2 = C \cdot (h\nu - E_g)$ , 计算出直接带隙 ( $E_g$ ) 分别为 2.38 eV(图 2(h)) 和

5.19 eV(图 2(i)), 其中,  $\alpha$  是吸收系数,  $h\nu$  是入射光子能量,  $C$  是常数.

分别比较该光电器件在黑暗条件下和在两种不同波长光下的  $I$ - $V$  响应特性. 图 3(a) 为半对数  $I$ - $V$  响应曲线, 在 8 V 的电压下器件的暗电流仅为 1.83 pA, 保证了器件的低噪声. 随着光照强度的增加, 光电流依次升高. 8 V 电压下, 在 365.2  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  (254 nm) 的光照下光电流达到了 6.5 nA, 即使在 52.8  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的低光照强度下光电流也有 1.52 nA, 表明了器件有高的信噪比. 如图 3(b), 可以看出, 光电探测器对 UVA(365 nm) 光并不敏感. 值得注意的是, 该异质结几乎没有整流特性<sup>[28]</sup>, 可以用异

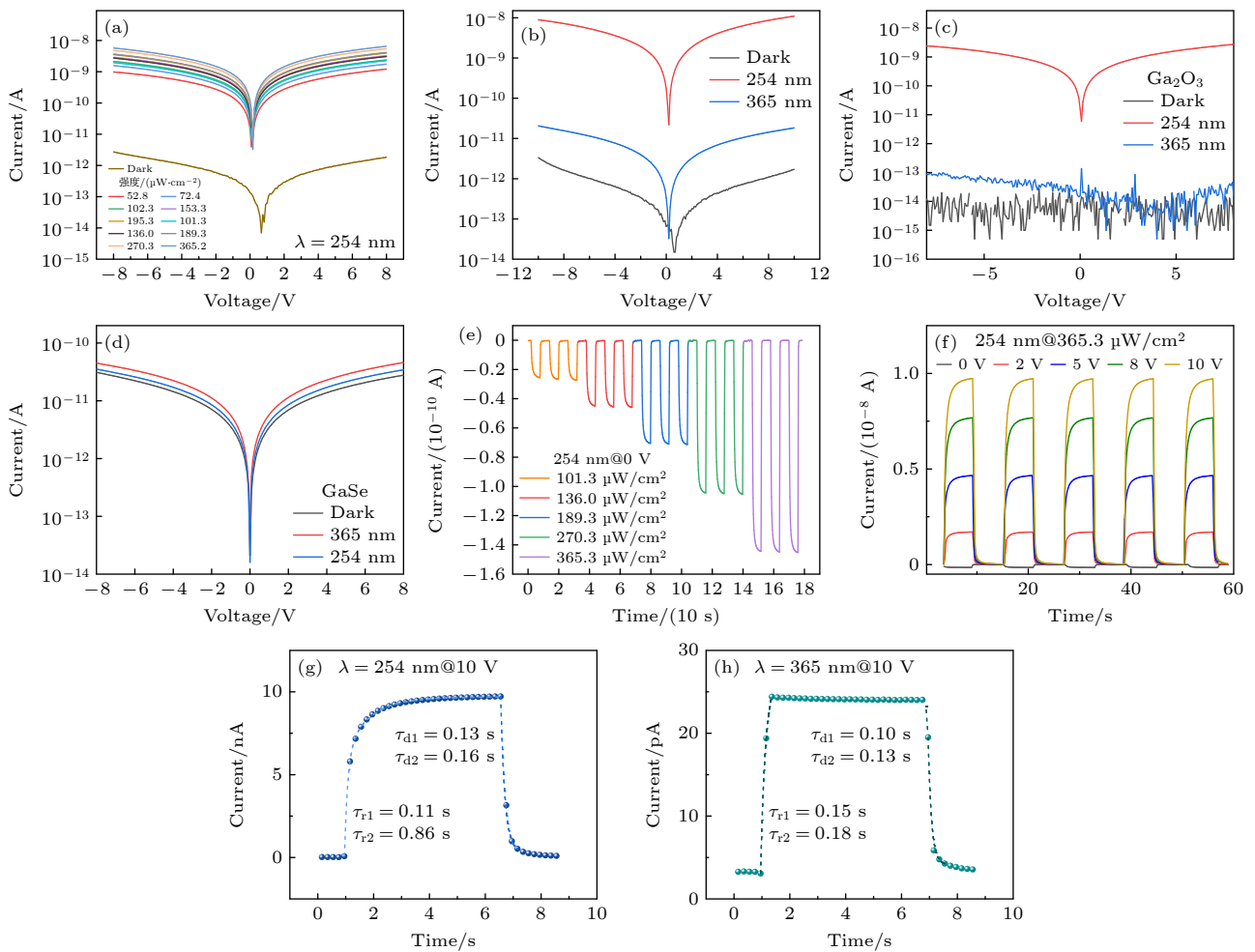


图 3 (a) 基于异质结的 PD 在具有不同光强度的 254 nm 光的黑暗和照明下的半对数  $I$ - $V$  曲线图; (b) 光电探测器在黑暗和光照下的响应曲线图; (c) Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜在黑暗和光照下的响应曲线图; (d) GaSe 在黑暗和光照下的响应曲线图; (e) 0 V 电压下光电探测器在不同光强的  $I$ - $t$  曲线图; (f) 强度为 365.3  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的 254 nm 光照下的不同偏置电压下光开关  $I$ - $t$  曲线图; (g) 在 10 V、强度为 365.3  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的 254 nm 光照下拟合响应时间图; (h) 在 10 V、强度为 348.3  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的 365 nm 光照下拟合响应时间图

Fig. 3. (a) The semi log  $I$ - $V$  curves of the heterojunction-based PD under dark and illumination of 254 nm light with various light intensities; the semi log  $I$ - $V$  curves under darkness and light of (b) photodetector, (c) Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film, (d) GaSe;  $I$ - $t$  curves with light on/off switching at (e) 0 V under various light intensities and (f) various bias voltages under 254 nm light illumination with an intensity of 365.3  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ; fitting response times under (g) 254 nm light illumination with an intensity of 365.3  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  at 10 V, (h) 365 nm light illumination with an intensity of 348.3  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  at 10 V.

质结载流子输送理论解释. 根据能带排列图, 两种材料异质界面处形成了正尖峰势垒, 同时 GaSe 以薄膜形式相较于二维层状材料较厚, 沟道变长, 电子空穴未抵达界面时已形成电子空穴对, 载流子浓度降低, 导致异质结整流特性消失. 两种波长的光下均能看到明显的零点漂移现象. 开路电压  $V_{oc}$  为 0.2 V, 证明了器件中存在内建电场 ( $E_{built-in}$ ) 并具备自供电能力. 此外, 分别制备了  $Ga_2O_3$  和 GaSe 的金属-半导体-金属 (MSM) 器件, 如图 3(c) 和图 3(d) 所示, 单个器件在黑暗和光照下都表现出明显的线性特征,  $Ga_2O_3$  响应 254 nm 的光, 而 GaSe 对两种波长的光都几乎不响应, 且两种材料器件都没有自供电, 这表明自供电光电行为是由 p-n 结的形成引起的.

图 3(e) 绘制了 254 nm 不同光强光照以及 0 V 电压下的  $I-t$  曲线, 在  $E_{built-in}$  作用下, 电子从 GaSe 漂移到  $Ga_2O_3$ , 形成负电流. 当光打开时, 大量光生载流子瞬间积累<sup>[29-31]</sup>; 当光源突然关闭时, 光生载流子并不会立即消失, 而是有一个缓慢的重新复合过程, 这导致在短时间内器件的电导率不会迅速恢复至施加光照前的初始状态<sup>[32,33]</sup>. 在相同的光照强度下选择三个测试周期, 可以看出随着光照强度的增加, 电流的绝对值相应增大, 这是由于照明强度增加时, 入射的光子数量增加, 产生更多的光激发载流子, 光电流增大. 同时, 施加不同偏压会相应地改变光电探测器内部的电场, 电压越高, 光生载流子迁移率越快,  $I_{photo}$  越大 (图 3(f)). 在 10 V, 光照强度  $365.3\mu W/cm^2$  条件下, 暗电流  $I_{dark}$  为 2.2 pA, 光电流  $I_{photo}$  达到了 9.7 nA, 这表明了对 254 nm 光照射的敏感性.

瞬态响应速度可以通过拟合方程<sup>[34]</sup>  $I = I_0 + Ae^{-t/\tau_1} + Be^{-t/\tau_2}$  进行评估. 其中  $I_0$  是稳态光电流,  $A$  和  $B$  为常数,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  是快弛豫时间和慢弛豫时间, 快速衰减过程可归因于能带间跃迁, 而慢速衰减过程可归因于与陷阱态有关的跃迁或深能级的跃迁, 在 10 V 偏压下, 分别测量了光电探测器在 254 和 365 nm 下探测单元的瞬态光响应, 得到了上升沿与下降沿的响应时间  $\tau_r/\tau_d$  为 0.11 s/0.13 s(254 nm), 0.15 s/0.10 s(365 nm), 如图 3(g) 和图 3(h) 所示.

图 4(a) 显示了探测器的光响应谱, 器件在  $\lambda = 250$  nm 处达到了最大光响应, 截止波长在 280 nm, 这与  $Ga_2O_3$  的吸收边基本一致<sup>[35]</sup>. 该结果表明器件的光生载流子主要由光子能量大于氧化镓  $E_g$  的光子产生. 由插图的半对数响应光谱可知, 探测器具有出色的波谱选择性, 且 UVC/Visible ( $R_{254\text{ nm}}/R_{600\text{ nm}}$ ) 的抑制比可以达到 354, UVA/Visible 抑制比 ( $R_{365\text{ nm}}/R_{600\text{ nm}}$ ) 也达到了 4.4. 为了评估光电探测器的性能, 引入光响应参数  $R$ ,  $D^*$ , PDCR 和 EQE. 他们通常被定义为<sup>[36,37]</sup>

$$R = \frac{I_{photo} - I_{dark}}{P \cdot S},$$

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{\frac{2qI_{dark}}{S}}},$$

$$PDCR = \frac{I_{photo} - I_{dark}}{I_{dark}},$$

$$EQE = \frac{hcR}{q\lambda},$$

其中  $P$  为光强,  $S$  为有效受光面积,  $e$  为单位电荷

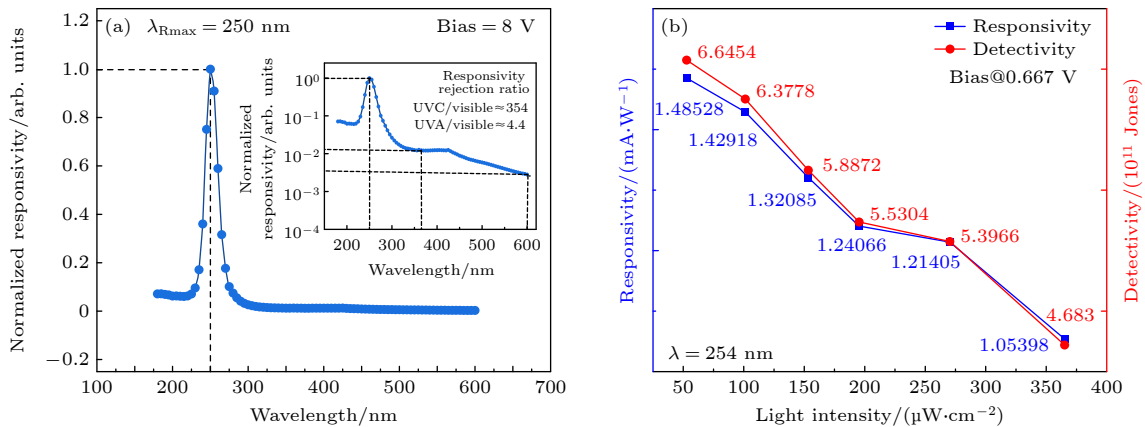


图 4 (a) GaSe/ $\beta$ - $Ga_2O_3$  异质结光电探测器的响应光谱图; (b) 响应度和探测率与光照强度的线性关系图

Fig. 4. (a) Spectrum responsivity of the GaSe/ $\beta$ - $Ga_2O_3$  photodetector; (b) linear relationship between responsivity and detectivity as a function of light intensity.

量,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $\lambda$  为波长. 假设噪声电流全部来源于暗电流产生的散粒噪声, 根据测量结果,  $S$  为  $0.1 \text{ mm}^2$ , 对于波长为  $254 \text{ nm}$  的光, 如图 4(b), 光照强度为  $52 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  下,  $R$  和  $D^*$  的最大值为  $1.49 \text{ mA}/\text{W}$  和  $6.65 \times 10^{11} \text{ Jones}$ . 总体来看,  $R$  随着光强度的增加而下降, 这种现象可能是由器件内部光生载流子饱和引起的<sup>[38]</sup>, EQE 值随着光强的增加而趋于降低, 可以通过光生电子空穴对增量比例的下降来理解, 增加光强度可以改善光生载流子的分离和传输过程, 从而显著增强 PDCR<sup>[39]</sup>, 在  $254 \text{ nm}$  光照下, PDCR 从  $1.12 \times 10^3$  增加到  $5.5 \times 10^3$ . 低暗电流和高 PDCR 表现出出色的信噪比, 是日盲紫外探测的基础. 表 1 列出了本工作的 GaSe/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质结光电探测器与其他报道的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光电探测器性能比较. 不难看出 GaSe/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的异质结器件实现了更低的暗电流、更高的光暗电流比和更好的响应度探测率.

如图 5(a) 所示, 根据安德森模型 (Anderson's rule), 导带偏移量 ( $\Delta E_c$ ) 可以通过两种半导体的电子亲和度的差来表示, 根据以往文献报道<sup>[46]</sup>, 氧化

镓和硒化镓的电子亲和势分别为  $4.2$  和  $3.4 \text{ eV}$ , 因此导带差约为  $0.8 \text{ eV}$ . 而价带差  $\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c$ , 为  $2.03 \text{ eV}$ .

GaSe/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质结构器件的电流运输机制和光响应特性可以从图 5(b) 所示的能带原理图中理解. 一旦 GaSe 和氧化镓接触, 由于费米能级的差异, 电子就会从氧化镓扩散到 GaSe (相应的空穴会向相反的方向扩散). 当两个费米能级对齐时, 能带就会弯曲, 而界面上的耗尽区和内置电势就会被构造出来. 最终, 在硒化镓和氧化镓之间形成了 II 型接触, 氧化镓一侧带正电, 硒化镓一侧带负电. 在能带图中描述了真空能级, 以确保氧化镓和硒化镓在形成异质结时的功函数保持不变. 在零偏压且日盲紫外光照射下, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 会吸收光子并产生电子-空穴对, 导致界面附近的载流子密度增大, 从而降低势垒高度. 内置的电子-空穴对、电子在导带上漂移到 n 型 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 在价带上漂移到 p 型 GaSe. 在这种情况下, 形成一个  $I_{\text{photo}}$ , 使设备能够自供电.

当对 p-n 结施加正向偏压时, 如图 5(c) 所示, 光生电子空穴对由于外部电场的存在得到补偿,

表 1 氧化镓基光电探测器性能比较

Table 1. Comparison of the performances of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based photodetectors.

photodetector	Wavelength/nm	$I_{\text{dark}}/\text{pA}$	PDCR	$R/(\text{mA}\cdot\text{W}^{-1})$	$D^*/\text{Jones}$	Reference
GaSe/ $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	1.83	$5.5 \times 10^3$	1.49	$6.65 \times 10^{11}$	This work
MoS <sub>2</sub> /Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	0.9	670	2.05	$1.2 \times 10^{11}$	[40]
p-GaN/ $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	3.08	$4.1 \times 10^3$	3800	$1.12 \times 10^{14}$	[41]
AgNW-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	<10	$1.2 \times 10^5$	14.8	$5.1 \times 10^{12}$	[42]
Ag <sub>2</sub> O/ $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	92.8	$3.4 \times 10^8$	25.65	$6.1 \times 10^{11}$	[43]
CuGaO <sub>2</sub> /Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	100	$2.3 \times 10^4$	0.03	$0.9 \times 10^{11}$	[44]
CuCrO <sub>2</sub> /Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	18	$3.5 \times 10^4$	0.12	$4.6 \times 10^{11}$	[44]
FTO/TiO <sub>2</sub> /Si-doped Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TFB/PEDOT:PSS	254	390	242.56	1.02	$0.46 \times 10^{11}$	[45]

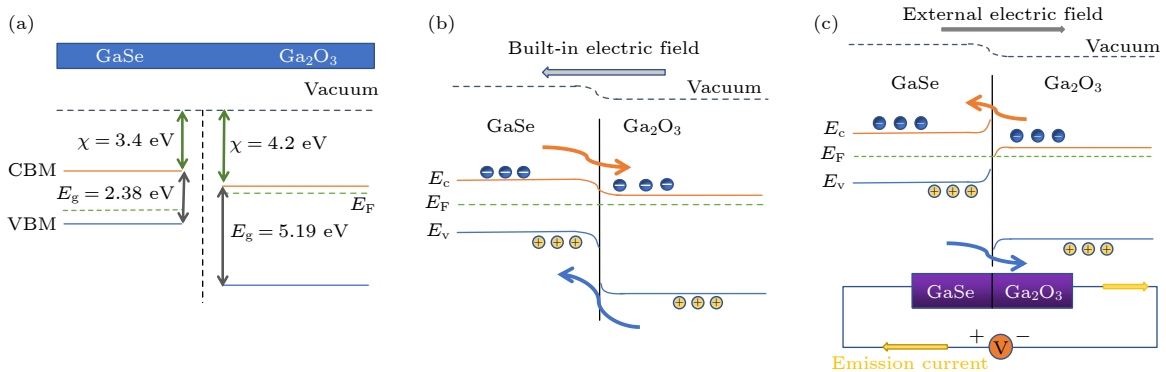


图 5 (a) GaSe 和 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的能带排列图; (b) 异质结零偏压下的能带传输机制图; (c) 异质结正偏压下的能带传输机制和等效电路模型图

Fig. 5. (a) Band arrangement of GaSe and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (b) band transport mechanism of heterojunction at zero bias; (c) band transport mechanism and equivalent circuit model of heterojunction under positive bias.

势垒高度降低, 电子在电场作用下向 GaSe 流动, 空穴向 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 流动, 从而形成从 GaSe 向 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 快速增加的电流. 同时, 大多数通过较低势垒的载流子也可以减少非辐射复合, 导致光电探测器产生较大的光电流.

## 4 结 论

本文制备了 GaSe/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质结光电探测器, 实现了日盲紫外光电探测. 得益于异质结形成的内建电场, 该探测器可以在零偏压下自驱动工作, 开路电压 ( $V_{oc}$ ) 为 0.2 V. 在 254 nm 光照下, 异质结有高响应性能, 包括在零偏压下 6.5 nA 的出色自供电电流和 0.11/0.13 s 的快速上升/衰减时间, 在 10 V 偏压下 PDCR 达到了  $5.5 \times 10^3$ . 响应度和探测度分别为 1.49 mA/W 和  $6.65 \times 10^{11}$  Jones. 优异的响应性能是因为在日盲光照下, 氧化镓与硒化镓典型的 II 型能带排列结构促进了载流子分离. 这些结果表明本文介绍的器件有优异的性能, 为自供电日盲光电探测提供了一种可行性策略.

## 参考文献

- [1] Xi Z Y, Liu Z, Yang L L, Tang K, Li L, Shen G H, Zhang M L, Li S, Guo Y F, Tang W H 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 40744
- [2] Lee S H, Kim S B, Moon Y J, Kim S M, Jung H J, Seo M S, Lee K M, Kim S K, Lee S W 2017 *ACS Photon.* **4** 2937
- [3] Tang X, Li K H, Zhao Y, Sui Y, Liang H, Liu Z, Liao C H, Babatain W, Lin R, Wang C, Lu Y, Alqatari F S, Mei Z, Tang W, Li X 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 1304
- [4] Wang Y H, Yang Z, Li H, Li S, Zhi Y, Yan Z, Huang X, Wei X, Tang W H, Wu Z 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 47714
- [5] Imura S, Mineo K, Miyakawa K, Nanba M, Ohtake H, Kubota M 2018 *IEEE Sensors J.* **18** 3108
- [6] Sorifi S, Kaushik S, Sheoran H, Singh R 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55** 365105
- [7] Chen Y, Lu Y, Liao M, Tian Y, Liu Q, Gao C, Yang X, Shan C 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1906040
- [8] Zhao B, Wang F, Chen H, Zheng L, Su L, Zhao D, Fang X 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1700264
- [9] Ozbay E, Biyikli N, Kimukin I, Kartaloglu T, Tut T, Aytur O 2004 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **10** 742
- [10] Xu Z, Zang J, Yang X, Chen Y, Lou Q, Li K, Lin C, Zhang Z, Shan C 2021 *Semicond. Sci. Technol.* **36** 065007
- [11] Liu Z, Li S, Yan Z, Liu Y, Zhi Y, Wang X, Wu Z, Li P, Tang W 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 5071
- [12] Li L, Liao F, Hu X 2020 *Superlattices Microstruct.* **141** 106502
- [13] Jing L, Ai C, Guo X, Cao J, Jing D, Luo B, Ma L 2023 *Ind. Eng. Chem. Res.* **62** 6103
- [14] Moon S, Bae J, Kim J 2022 *J. Mater. Chem. C* **10** 6281
- [15] Lu C, Gao L, Meng F, Zhang Q, Yang L, Liu Z, Zhu M, Chen X, Lyu X, Wang Y, Liu J, Ji A, Li P, Gu L, Cao Z, Lu N 2023 *J. Appl. Phys.* **133** 045306
- [16] Han Y, Jiao S, Jing J, Chen L, Rong P, Ren S, Wang D, Gao S, Wang J 2023 *Nano Res.* **17** 2960
- [17] Li X, Dong J, Idrobo J C, Puzos A A, Rouleau C M, Gehegan D B, Ding F, Xiao K 2016 *J. Am. Chem. Soc.* **139** 482
- [18] Qasrawi A F 2005 *Cryst. Res. Technol.* **40** 610
- [19] Lei S, Ge L, Liu Z, Najmaei S, Shi G, You G, Lou J, Vajtai R, Ajayan P M 2013 *Nano Lett.* **13** 2777
- [20] Yuan X, Tang L, Liu S, Wang P, Chen Z, Zhang C, Liu Y, Wang W, Zou Y, Liu C, Guo N, Zou J, Zhou P, Hu W, Xiu F 2015 *Nano Lett.* **15** 3571
- [21] Ben Aziza Z, Henck H, Pierucci D, Silly M G, Lhuillier E, Patriarche G, Sirotti F, Eddrief M, Ouerghi A 2016 *ACS Nano* **10** 9679
- [22] Parlak M, Qasrawi A F, Ercelebici C 2003 *Mater. Sci.* **38** 1507
- [23] Yan Z, Li S, Liu Z, Zhi Y, Dai J, Sun X, Sun S, Guo D, Wang X, Li P, Wu Z, Li L, Tang W 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 4502
- [24] Mudiyansele D H, Wang D, Fu H 2022 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **10** 89
- [25] Lin R, Zheng W, Zhang D, Zhang Z, Liao Q, Yang L, Huang F 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 22419
- [26] Abdullah M M, Bhagavannarayana G, Wahab M A 2010 *J. Cryst. Growth* **312** 1534
- [27] Jubu P R, Yam F K, Igba V M, Beh K P 2020 *J. Solid State Chem.* **290** 121576
- [28] Zhang M L, Ma W Y, Wang L, Liu Z, Yang L L, Li S, Tang W H, Guo Y F 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 160201 (in Chinese) [张茂林, 马万煜, 王磊, 刘增, 杨莉莉, 李山, 唐为华, 郭宇锋 2023 *物理学报* **72** 160201]
- [29] Li Z, Xu Y, Zhang J, Cheng Y, Chen D, Feng Q, Xu S, Zhang Y, Zhang J, Hao Y, Zhang C 2019 *IEEE Photon. J.* **11** 1
- [30] He T, Li C, Zhang X, Ma Y, Cao X, Shi X, Sun C, Li J, Song L, Zeng C, Zhang K, Zhang X, Zhang B 2019 *Phys. Status Solidi. (a)* **217** 1900861
- [31] Yakimov E B, Polyakov A Y, Shchemerov I V, Smirnov N B, Vasilev A A, Vergeles P S, Yakimov E E, Chernykh A V, Shikhov A S, Ren F, Pearton S J 2020 *APL Mater.* **8** 111105
- [32] Bae J, Park J H, Jeon D W, Kim J 2021 *APL Mater.* **9** 101108
- [33] Qian L X, Liu H Y, Zhang H F, Wu Z H, Zhang W L 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 113506
- [34] Chen M, Zhang Z, Lv Z, Zhan R, Chen H, Jiang H, Chen J 2022 *ACS Appl. Nano Mater.* **5** 351
- [35] Ricci F, Boschi F, Baraldi A, Filippetti A, Higashiwaki M, Kuramata A, Fiorentini V, Fornari R 2016 *J. Phys.: Condens. Matter* **28** 224005
- [36] Filippo E, Tepore M, Baldassarre F, Siciliano T, Micocci G, Quarta G, Calcagnile L, Tepore A 2015 *Appl. Surf. Sci.* **338** 69
- [37] Kong W Y, Wu G A, Wang K Y, Zhang T F, Zou Y F, Wang D D, Luo L B 2016 *Adv. Mater.* **28** 10725
- [38] Liang S J, Cheng B, Cui X, Miao F 2019 *Adv. Mater.* **32** 1903800
- [39] Kumar N, Kumail M, Lee J, Park H G, Kim J 2023 *Mater. Res. Bull.* **168** 112466
- [40] Zhuo R, Wu D, Wang Y, Wu E, Jia C, Shi Z, Xu T, Tian Y, Li X 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 10982
- [41] Ma Y, Chen T, Zhang X, Tang W, Feng B, Hu Y, Zhang L, Zhou X, Wei X, Xu K, Mudiyansele D, Fu H, Zhang B 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 35194
- [42] Tan P, Zhao X, Hou X, Yu Y, Yu S, Ma X, Zhang Z, Ding M, Xu G, Hu Q, Gao N, Sun H, Mu W, Jia Z, Tao X, Long S

- 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100173
- [43] Park S, Park T, Park J H, Min J Y, Jung Y, Kyoung S, Kang T Y, Kim K H, Rim Y S, Hong J 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 25648
- [44] 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
- [45] Nguyen T M H, Tran M H, Bark C W 2023 *ACS Appl. Electronic Mater.* **5** 6459
- [46] Wang Y, Tang Y, Li H, Yang Z, Zhang Q, He Z, Huang X, Wei X, Tang W, Huang W, Wu Z 2021 *ACS Photon.* **8** 2256

# GaSe/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction based self-powered solar-blind ultraviolet photoelectric detector<sup>\*</sup>

Su Ran<sup>1)</sup> Xi Zhao-Ying<sup>1)</sup> Li Shan<sup>1)</sup> Zhang Jia-Han<sup>2)3)</sup>  
 Jiang Ming-Ming<sup>4)</sup> Liu Zeng<sup>2)†</sup> Tang Wei-Hua<sup>1)‡</sup>

1) (*Innovation Center of Gallium Oxide Semiconductor (IC-GAO), College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

2) (*School of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China*)

3) (*School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

4) (*MIT Key Laboratory of Aerospace Information Materials and Physics, College of Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China*)

( Received 16 February 2024; revised manuscript received 14 April 2024 )

## Abstract

UV photodetectors have the advantages of high sensitivity and fast response speed. As an ultra-wide bandgap semiconductor, gallium oxide (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) plays an extremely important role in detecting deep ultraviolet. It can form a typical type-II heterostructure with GaSe, promoting carrier separation and transport. In this work, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epitaxial films are grown on sapphire substrates by plasma-assisted chemical vapor deposition (PECVD). The GaSe films and GaSe/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction photodetectors are grown on gallium oxide films by Bridgeman technology. The detector has a good response to deep ultraviolet light, the dark current of the device is only 1.83 pA at 8 V, and the photocurrent reaches 6.5 nA at 254 nm. The UVC/Visible (254 nm/600 nm) has a high rejection ratio of about 354. At very small light intensities, the responsivity and detection can reach 1.49 mA/W and  $6.65 \times 10^{11}$  Jones, respectively. At the same time, due to the photovoltaic effect formed by the space charge region at the junction interface, the detector exhibits self-powered supply performance at zero bias voltage, and the open-circuit voltage is 0.2 V. In addition, the detector has a very good sensitivity. The device can respond quickly, whether it is irradiated with different light intensities under constant voltage, or with different voltages under constant light intensity. It can respond within milliseconds under a bias voltage of 10 V. This work demonstrates the enormous potential of heterojunctions in photoelectric detection by analyzing the photophysical and interface physical issues involved in heterojunction photodetectors, and provides a possibility for detecting the deep ultraviolet of gallium oxide.

**Keywords:** photoelectric detector, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GaSe, self-power

**PACS:** 85.60.Gz, 52.70.Kz

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240267

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62204125, 62305171), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB3605404), and the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U23A20349).

† Corresponding author. E-mail: [zengliu\\_imu@163.com](mailto:zengliu_imu@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [whtang@njupt.edu.cn](mailto:whtang@njupt.edu.cn)



基于GaSe/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>异质结的自供电日盲紫外光电探测器

宿冉 奚昭颖 李山 张嘉汉 姜明明 刘增 唐为华

**GaSe/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction based self-powered solar-blind ultraviolet photoelectric detector**

Su Ran Xi Zhao-Ying Li Shan Zhang Jia-Han Jiang Ming-Ming Liu Zeng Tang Wei-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 118502 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240267

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240267>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于HfO<sub>2</sub>插层的Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基金属-绝缘体-半导体结构日盲紫外光电探测器

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based metal-insulator-semiconductor solar-blind ultraviolet photodetector with HfO<sub>2</sub> inserting layer

物理学报. 2023, 72(9): 097302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222222>

基于铝纳米颗粒修饰的非晶氧化镓薄膜日盲紫外探测器

High performance amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film solar blind ultraviolet photodetectors decorated with Al nanoparticles

物理学报. 2023, 72(3): 038501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221476>

WO<sub>3</sub>/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>异质结深紫外光电探测器的高温性能

Investigation of high-temperature performance of WO<sub>3</sub>/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction deep-ultraviolet photodetectors

物理学报. 2023, 72(16): 160201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230638>

基于云母衬底生长的非晶Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>柔性透明日盲紫外光探测器研究

Flexible transparent solar blind ultraviolet photodetector based on amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grown on mica substrate

物理学报. 2021, 70(23): 238502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211039>

基于GaN/(BA)<sub>2</sub>PbI<sub>4</sub>异质结的自供电双模式紫外探测器

Self-powered dual-mode UV detector based on GaN/(BA)<sub>2</sub>PbI<sub>4</sub> heterojunction

物理学报. 2024, 73(6): 067301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231698>

N掺杂对 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜日盲紫外探测器性能的影响

Effect of N-doping on performance of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film solar-blind ultraviolet detector

物理学报. 2021, 70(17): 178503 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210434>