

基于 GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结的自供电双模式紫外探测器*

张盛源¹⁾ 夏康龙¹⁾ 张茂林^{1)†} 边昂^{2)‡}

刘增^{1)3)††} 郭宇锋¹⁾ 唐为华¹⁾

1) (南京邮电大学集成电路科学与工程学院 (产教融合学院), 南京 210023)

2) (江苏科技大学理学院, 镇江 212100)

3) (杭州萧山技师学院, 杭州 311201)

(2023 年 10 月 25 日收到; 2023 年 12 月 14 日收到修改稿)

紫外探测器作为智能光电系统的重要组成部分, 近年来在诸多领域应用广泛, 其中自供电异质结光电二极管的研究显得尤为重要. 本文制备并讨论了一种双模式运行的 GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结紫外光电二极管. 通过金属有机化学气相沉积法在蓝宝石上沉积 GaN 薄膜, 再在 GaN 薄膜表面旋涂 (BA)₂PbI₄ 薄膜, 用于构建平面异质结探测器. 当在 +5 V 偏压驱动、光强为 421 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 365 nm 紫外光照射下, 响应度 (R) 和外量子效率 (EQE) 分别为 60 mA/W 和 20%. 在自供电模式下, 上升时间 (τ_r) 和衰减时间 (τ_d) 分别为 0.12 s 和 0.13 s. 这些结果共同证明了基于 GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结的自供电紫外光电二极管拥有广阔的发展前景, 为智能光电系统的发展提供了新的思路.

关键词: 宽禁带半导体, 钙钛矿, 异质结, 自供电紫外探测器

PACS: 73.40.Lq, 85.60.Gz, 95.85.Mt

DOI: 10.7498/aps.73.20231698

1 引言

紫外光电探测器作为智能光电系统的重要组成部分, 已经在现代医疗、光通信以及火灾预警等领域有着众多实际应用^[1]. 传统的第一代和第二代半导体材料由于禁带宽度较小、截止波长较大, 用于紫外探测时往往需要加上滤光层, 使器件尺寸增加, 不能很好满足目前的发展需求. 而第三代半导体因其禁带宽度 (E_g) 大于 2.3 eV, 又被称为宽

禁带半导体. 用于紫外探测时不需要额外的特殊处理, 并且可以通过合金和能带工程调控其禁带宽度^[2-5], 因此在深紫外探测方面具有天然的优势. 近几年随着材料生长技术和器件加工能力的进步与发展, 宽禁带半导体的生长与获得变得更加容易, 基于宽禁带半导体的紫外光电探测器及其相应应用的研究也取得了很大的进展.

氮化镓 (GaN) 作为第三代半导体, 其禁带宽度约为 3.4 eV, 是紫外探测的天然材料^[3]. 此外, 其优异的物理和化学性质使其制成的器件具备高稳

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3605404)、国家自然科学基金联合基金 (批准号: U23A20349)、国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 62204125, 62304113, 62305135) 和南京邮电大学引进人才科研启动基金 (自然科学) (批准号: XK1060921115, XK1060921002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mlzhang@njupt.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: angbian@just.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: zengliu@njupt.edu.cn

定度的特点. 近年来, 基于 GaN 的紫外探测器的研究主要集中在金属-半导体-金属 (MSM)、肖特基结和异质结等结构上. 对于 MSM 探测器, 主要问题是光关闭后的持续光电导效应, 这主要是由于半导体固有缺陷导致的^[5], 如 Ga 空位和晶格缺陷等. 近年来, 研究人员不断优化结构设计, 开发出具有良好光响应率的探测器, 但这些探测器通常需要外加偏置电压, 增加了探测器的尺寸, 不利于器件小型化的发展需求^[6]. 异质结和肖特基结探测器由于材料功函数的不同, 可能会由于载流子的扩散效应在结的界面处产生内建电场, 使得光生载流子能够自发地、快速地分离, 不仅提高了响应速度, 还实现了自供电运行. 然而肖特基结探测器由于表面的金属电极阻碍了紫外线的进入^[5,7], 导致响应性能相对较差. 相比之下, 具有自供电能力和快速光响应的异质结探测器无疑具有巨大的优势, 有利于未来小型化高效智能集成网络的发展需求^[8-18].

综上所述, 本文采用了一种 Ruddlesden-Popper (RP) 钙钛矿与 GaN 组成异质结探测器. RP 钙钛矿被认为是另一种具有不同结构和电子特性的新兴材料, 具备可调的光电特性和高度的结构灵活性^[19]. 此外, 钙钛矿还表现出较好的光稳定性和化学稳定性, 这对光电应用至关重要. 因此, 本文提出了一种通过化学气相沉积和旋涂的方法, 采用 P 型 RP 材料 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 叠加 n 型 GaN 的异质结构来制备光电探测器. 构筑了一种鲜有报道的 GaN/ $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 异质结紫外探测器并详细讨论了其响应性能和光物理性质.

2 实 验

首先, 采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术在蓝宝石衬底上生长 GaN 薄膜. 然后, 通过热释胶带掩模技术, 将 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 的前驱体溶液旋涂在半掩模的 GaN 薄膜上, 加热蒸发后, 前驱体溶液转变为 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 薄膜, 完成 GaN/ $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 平面异质结的构筑. 然后在获得的 GaN/ $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 平面异质结的基础上, 用机械转移法将铟 (In) 金属的圆柱片分别转移到 GaN 和 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 薄膜表面, 作为电极使用. 其中, GaN 为商业获取的 n 型半导体, 根据文献报道 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 通常为 p 型半导体^[20,21], 因此本文构筑的是一个用于紫外探测的 p-n 结光电二极管. 通过光学显微镜测量得到

异质结探测器的有效光照面积 (s) 约为 0.06 mm^2 . 为了验证本研究中制备的薄膜材料的晶体质量, 采用 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 等材料表征技术, 并利用能量色散光谱法 (EDS) 分析了异质结的元素组成和含量. 为了验证半导体材料的光学吸收特性, 实验测量了紫外-可见吸收光谱 (UV-vis) 来确定半导体的禁带宽度. 最后, 使用 Keysight 1505A 半导体测试仪器表征该异质结光电探测器的紫外光电响应特性, 同时用发射 365 nm 紫外光的紫外灯作为辐照光源照射样品.

3 结果与讨论

图 1(a) 和图 1(b) 所示为异质结元素 mapping 图, 显示 Pb, I 元素和 Ga, N 元素均匀地分布在薄膜两侧且轮廓清晰, 表明了 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 薄膜均匀地覆盖在 GaN 表面. GaN/ $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 异质结的 XRD 图谱如图 1(a) 插图所示, 结果显示了 GaN 的 (002) 衍射峰和 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 的 (004), (006), (008) 衍射峰, 与之前报道的相一致^[22-24]. 图 1(c) 为 EDS 谱图, 用于元素含量分析, Ga, I, Pb, N 的质量百分比为 47.3%, 25.2%, 21.4%, 6.1%. 由于 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 薄膜是旋涂形成, 所以 GaN 和 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 两种不同的半导体材料通过范德瓦耳斯力结合在一起, 通过图 1(d) 和图 1(e) 的 SEM 图可观察到 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 薄膜均匀致密的覆盖于 GaN 薄膜的表面, 形成了稳定的异质结结构.

基于方程 $(\alpha h\nu)^2 = C(h\nu - E_g)$, 通过拟合 $(\alpha h\nu)^2$ 和 $(h\nu)$ 的函数曲线, 可以得到 GaN 和 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 的禁带宽度, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 其中 $h\nu$ 为光子能量, E_g 是禁带宽度, C 是常数, α 是吸收系数, h 是普朗克常数. 计算所得的 GaN 和 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 的禁带宽度分别为 3.35 eV 和 2.31 eV, 与文献^[25]报道的基本一致, 进一步说明了异质结具有良好的质量. 图 2(c) 为 GaN/ $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 异质结的紫外-可见光响应光谱, 观测到异质结的最大响应波长在 370 nm 处, 与前文计算所得的 GaN 禁带宽度可以相互验证.

异质结紫外光电探测器的结构如图 3(a) 所示. 图 3(b) 为异质结紫外光电探测器分别在黑暗和不同强度的 365 nm 紫外光照射下的 $I-V$ 特性曲线, 该器件表现出典型的整流特性, 说明 GaN 与 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 接触表面形成了稳定的内建电场. 同时

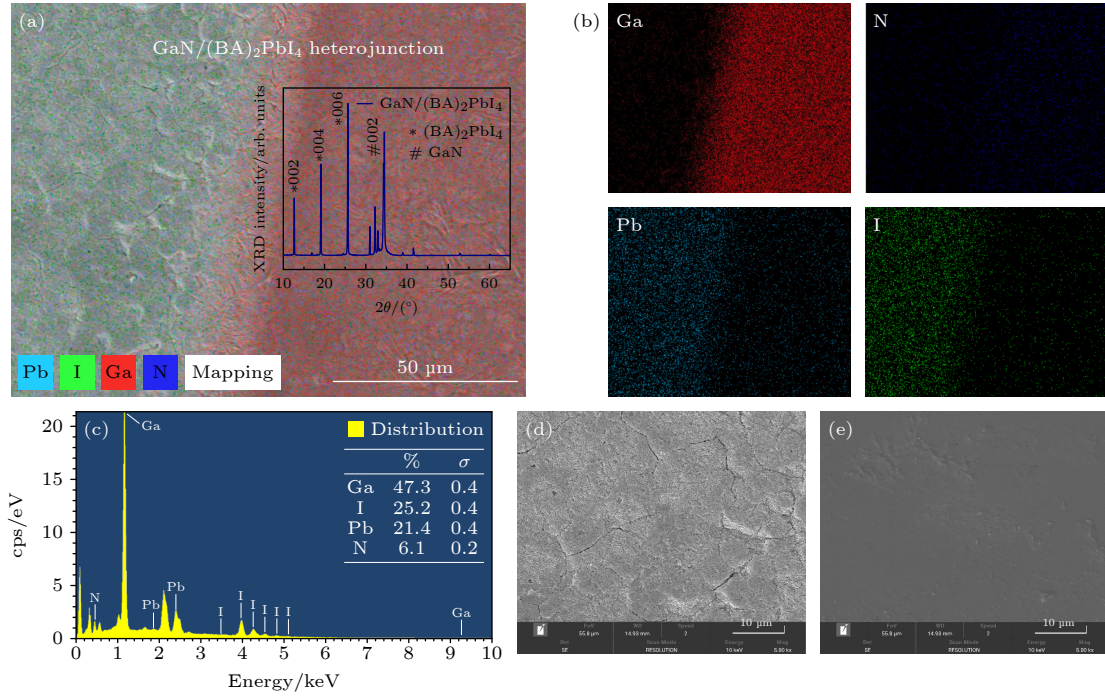


图 1 (a) 异质结的 SEM 图像, 内插图为 GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结的 XRD 图谱; (b) 异质结的 EDS 元素图; (c) GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结的能谱; (d) (BA)₂PbI₄ 薄膜的 SEM 图; (e) GaN 薄膜的 SEM 图

Fig. 1. (a) SEM image of heterojunction, inset shows the XRD patterns of GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction; (b) EDS elemental maps of heterojunction; (c) energy spectrum of GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction; (d) SEM image of (BA)₂PbI₄ thin film; (e) SEM image of GaN thin film.

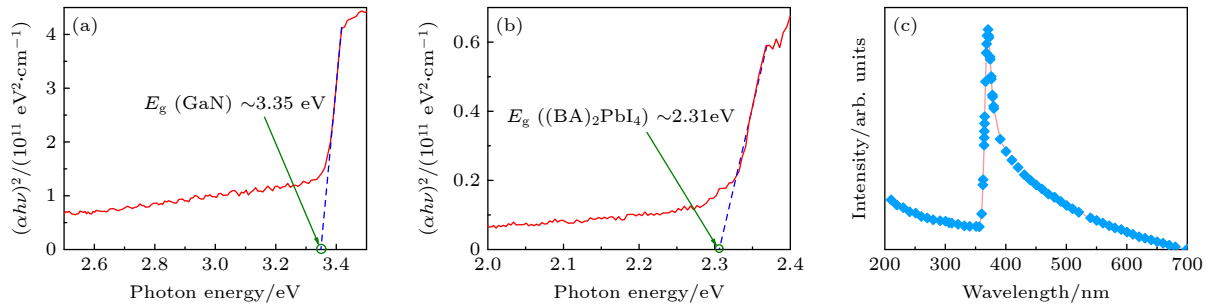


图 2 (a), (b) $(\alpha h\nu)^2$ 与 $(h\nu)$ 的拟合函数图; (c) GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结的紫外-可见光响应谱

Fig. 2. (a), (b) Plot of $(\alpha h\nu)^2$ as a function of photon energy ($h\nu$); (c) the UV-vis response spectrum of the GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction.

可以观察到明显的短路电流, 说明紫外光电探测器可以在自供电模式下运行. 从图 3(b) 可以看出, 在黑暗条件下, 该器件具有较低的暗电流 (I_{dark}), 在 +5 V 和 -5 V 电压驱动下, I_{dark} 分别为 861 pA 和 7.6 pA. 本文主要将 I_{dark} 作为噪声来源, 所以较低的 I_{dark} 将具有更小的噪声影响和更高的灵敏度. 在 ± 5 V 处, 黑暗条件下的整流比约为 540, 紫外光照射后, 由于载流子浓度的升高, 使整流比增加到约 30425. 值得注意的是, 该紫外光电探测器在正、负电压下对 365 nm 紫外光均表现出了良好光响应特性, 且光电流 (I_{photo}) 随光强的增强而提升. 证

明了该紫外光电探测器可以实现双模式工作, 分别为反向偏置下的耗尽模式和正向偏置下的光电导模式. 普通 p-n 结二极管一般工作在反向偏压下. 但是二极管本身在正向偏压下未能完全饱和, 或者该半导体材料对于辐照源的响应能力巨大的情况下, 就会出现正向与反向都可以响应的现象, 这种情况在宽禁带半导体这类本身暗电流比较低的器件中更为常见. 在正偏下, 耗尽层变薄, 光电导模式下探测器类似于一个光敏电阻, 其输运机制可以用光电导理论解释. 相反, 在反向偏置下, 耗尽层变厚, 可以用热电子发射理论来解释:

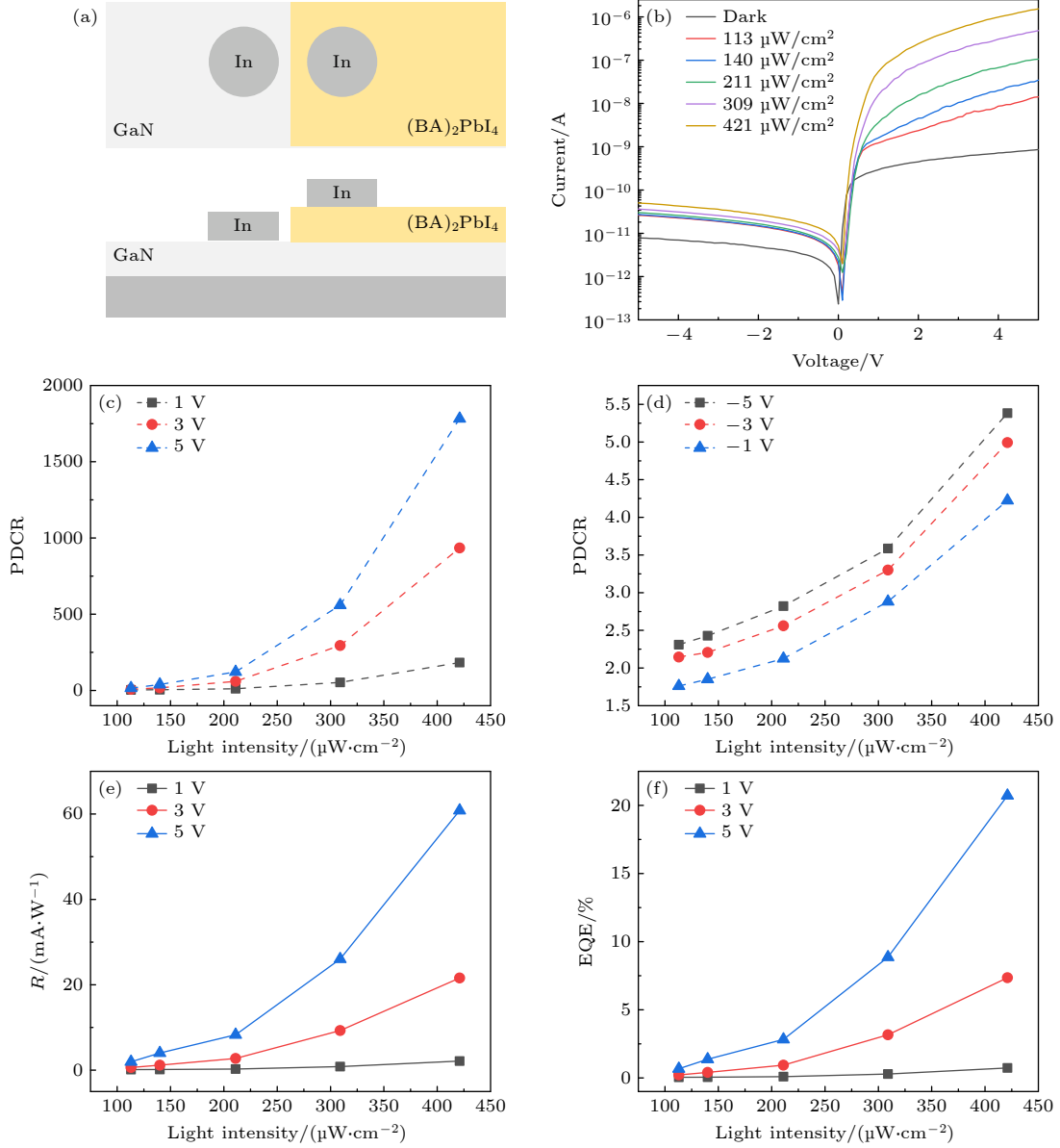


图 3 (a) GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结光电探测器示意图; (b) 异质结光电探测器在黑暗中和不同强度的 365 nm 紫外光照下的对数坐标 I - V 特性曲线; (c), (d) 在不同电压下探测器的 PDCR 和光强度的关系; (e), (f) 在不同电压下响应度 (R) 和外部量子效率 (EQE) 与光强度的关系

Fig. 3. (a) Schematic diagram of the GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction photodetector; (b) I - V characteristics in a log coordinate of the heterojunction photodetector in the dark and under 365 nm UV light illumination with various intensities; (c), (d) PDCR of the PD replying on the light intensity under various voltages; (e), (f) responsivity (R) and external quantum efficiency (EQE) replying on the light intensity under various voltages.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_B}{k_B T}\right), \quad (2)$$

其中 I_0 为饱和电流, q 为电子电荷, V 为偏置电压, T 为温度, A 为金属半导体接触的有效面积, A^* 为有效理查德森常数, n 为理想因子, k_B 为玻尔兹曼常数, φ_B 为异质结界面的势垒高度. 所以, 正反偏压下载流子运输机制的不同, 使探测器可以实现双

模式探测, 分别为正偏下的光电导模式和反偏下的耗尽模式.

本文用光-暗电流比 (PDCR)、响应度 (R) 和外部量子效率 (EQE) 作为衡量光电探测器的重要指标来表征探测器性能. PDCR 是衡量光电探测器对某一特定波长紫外光敏感度的重要指标, 表达式为

$$\text{PDCR} = \frac{I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}}{I_{\text{dark}}}. \quad (3)$$

其中 I_{photo} 为光电流, I_{dark} 为暗电流. 响应度 (R) 用来评估光电探测的光响应能力, 可以表示为

$$R = \frac{I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}}{PS}, \quad (4)$$

其中 P 为光强, S 为光电探测器的有效照明面积, 在本文中为 $6 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$. 外部量子效率 (EQE) 是表示光子到电子转换效率的一个重要参数, 其公式为

$$\text{EQE} = \frac{hcR}{e\lambda}. \quad (5)$$

其中 h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为入射光的波长, 在本文中为 365 nm. 图 3(c) 和图 3(d) 为光电探测器在不同电压不同光强下的光-暗电流比 (PDCR). 在同样功率密度为 $421 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 365 nm 光照射下, +5 V 时 PDCR 为 1783, -5 V 时 PDCR 为 5.4, 证明该紫外光电探测器可以实现双模式工作. 在正向偏置条件下, 光电探测器的 PDCR 值高于反向偏置. 这可能是由于正反偏下载流子运输机制的不同, 以及异质结的整流作用. 图 3(e) 和图 3(f) 为探测器在功率密度为 $421 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 365 nm 光照射和 +5 V 电压驱动下的响应度 (R) 和外量子效率 (EQE). 在 +5 V 电压下响应度 R 为 60 mA/W, 说明探测器对 365 nm 的紫外光具有较高的探测灵敏度. 通过计算, 可以得到外量子效率 EQE 为 20%, 表明照射到器件的光子可以有效的激发电子-空穴对. 从这些性能指标可以看出, 本工作所制备的 GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结紫外探测器具有优异的性能. 在图 3(e) 和图 3(f) 中, 由于在工作的光强度范围内光响应没有达到饱和, R 和 EQE 表现出随着光强的增加而上升的现象. 此外, 为了证明图 3(b) 的整流效应来源于异质结的构筑, 测试了 GaN 和 (BA)₂PbI₄ 各自的电流-电压特性, 如图 4 所示, 其均为近欧姆接触.

为了研究随着紫外光源的开关光电流在时域下的变化规律和稳定性, 测量了瞬时光响应与光强的关系图谱, 如图 5(a) 和图 4(b) 所示. 这两幅图很好地展现了光电流随着光源开关和光强变化在时域下的稳定性, 以及光响应随光强的变化规律. 此外, 当施加的电压相同时, 随着光强的增加, 更多的电子被激发跃迁至导带, 形成更高的光电流. 因此, 越强的紫外光强产生的光电流越大. 同样, 在相同的紫外光强度下, 施加更大的电压也可以获得更大的光电流, 因为电压的增加使载流子

漂移速度增大, 并且更多的被表面缺陷俘获的载流子挣脱了束缚. 在图 5(a) 中, 与图 3(b) 相比, 同样在 +5 V 电压的驱动下, 照射功率密度同为 $421 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 365 nm 紫外光, 光电流从 $1.5 \mu\text{A}$ 增加到 $2.5 \mu\text{A}$. 这可能是因为异质结表面存在缺陷, 少数载流子被缺陷俘获, 导致载流子复合受限, 延长了复合时间, 从而使光电流增加, 产生了持续的光电导效应 [26].

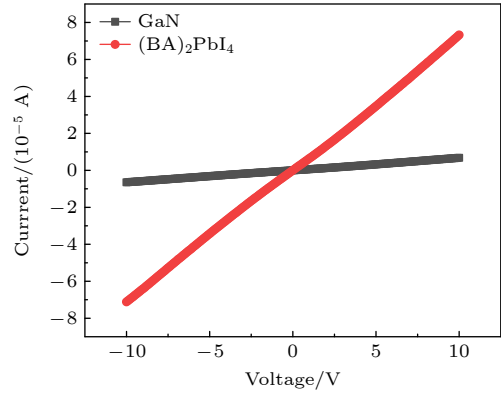


图 4 GaN 和 (BA)₂PbI₄ 的电流-电压特性曲线.

Fig. 4. Current-voltage curves of GaN and (BA)₂PbI₄.

为了研究自供电模式下器件的响应情况, 测量得到的光电探测器在自供电模式下的瞬态响应如图 5(c) 所示. 值得注意的是, 由于在没有外加电压时光生载流子受内建电场的驱动不能被电极快速收集, 因此随着光强的增加, 光电流的过冲现象愈加显著. 此外, 图 5(c) 中的 I - t 图像表现出正值负值交替响应的现象. 这可能由于异质结制备过程中, 表面会存在缺陷. 虽然这些缺陷不会影响异质结的能带图的基本形状, 但是会参与载流子的运输, 导致在光照关闭时, 电子穿透势垒经过界面能级进入 P 区, 发生隧穿, 使暗电流为正值. 同时, 光电流受内建电场的控制为负值, 因此图 5(c) 中, 光电流随着光照的打开和关闭出现负值和正值的交替变化. 在图 5(c) 的基础上, 为了进一步研究光响应, 利用指数弛豫方程提取上升时间 (τ_r) 和下降时间 (τ_d) 用于对光生和复合过程进行研究,

$$I = I_0 + Ae^{-t/\tau}, \quad (6)$$

其中 I_0 为稳态 I_{photo} , A 为常数, t 为时间, τ 为弛豫时间常数. 图 5(c) 插图给出了没有外加偏置时 $113 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 紫外光照下的上升和衰减时间的拟合结果. 此时, 探测器表现出较快的响应速度, 上升和下降时间分别为 0.12 s 和 0.13 s. 将本文制备

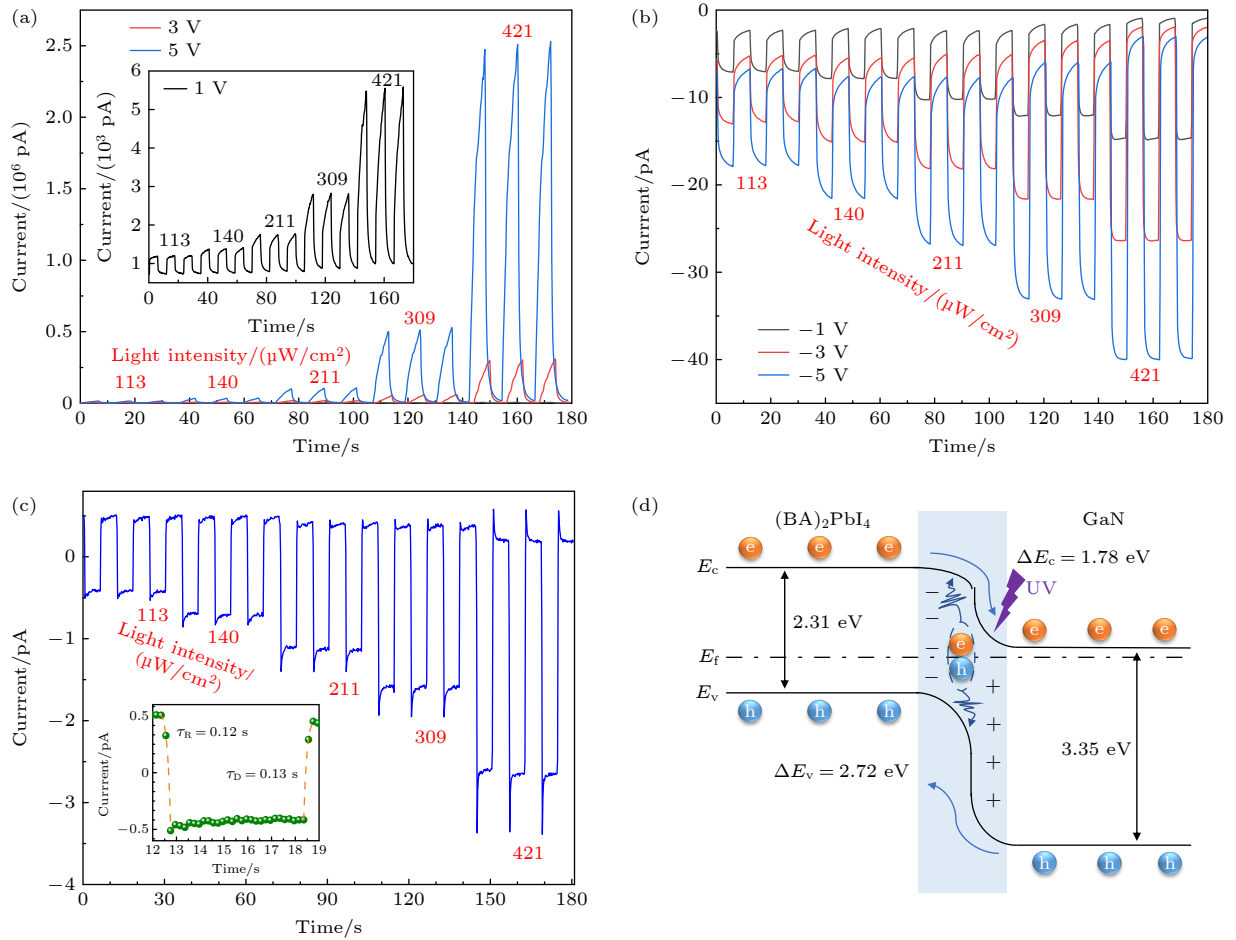


图 5 在 365 nm 紫外光照射下 (a) 正电压和 (b) 负电压下的 $I-t$ 曲线, (a) 的插图显示了 1 V 下的 $I-t$ 曲线; (c) 零偏置时 365 nm 光照下的 $I-t$ 曲线, 插图显示了器件在 365 nm 光照射下的瞬态响应, 零偏置时的功率密度为 $113 \mu\text{W}/\text{cm}^2$; (d) 零偏置时异质结光电探测器的带状图

Fig. 5. The $I-t$ curves at (a) positive voltages and (b) negative voltages under the illuminations of 356 nm UV light, inset of (a) shows the $I-t$ curves at 1 V; (c) the $I-t$ curves under 365 nm light illumination at zero bias, inset shows transient responses of the devices under the 365 nm light illumination with a power density of $113 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ at zero bias; (d) the band diagram of the heterojunction photodiode at zero bias.

表 1 基于 GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结的光电二极管紫外探测器性能参数比较

Table 1. Parameters comparison of self-powered GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction UV photodiode.

Photodiode	Bias voltage/V	Wavelength/nm	$R/(\text{mA}\cdot\text{W}^{-1})$	Rise/Decay time/s	Ref.
n-ZnO/p-GaN	0	374	1×10^{-3}	N/A	[27]
GaN nanorods	3	325	26	0.33/0.99	[28]
GaN/ZnO/ZnO	-5	360	90	N/A	[29]
r-GO/GaN	0	350	1.54	0.06/0.267	[30]
ZnO/CdS/GaN	0	300	176	0.35	[31]
GaN/(BA) ₂ PbI ₄	0	365	1.96×10^{-4}	0.12/0.13	This work
GaN/(BA) ₂ PbI ₄	+5	365	60	N/A	This work

的 GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结光电探测器与最近报道的其他探测器进行比较 (表 1), 表明本文制备的探测器具有较为优异的性能。

为了进一步阐释异质结紫外光电探测器的探测机理, 通过结合前文计算所得数据以及查阅相

关文献 [25, 32], 绘制了 GaN/(BA)₂PbI₄ 异质结的能带图, 如图 5(d) 所示。根据扩散理论, 电子从 n-GaN (高费米能级) 一侧转移至 p-(BA)₂PbI₄ 一侧 (低费米能级), 而空穴则沿相反的方向转移, 直到达到热平衡状态。在这种平衡状态下, 异质结

界面处会形成由 GaN 指向 $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 的内建电场. 在没有外加偏压时, 用紫外光照射异质结光电探测器, 会产生光生电子-空穴对, 并在内建电场的作用下分离, 载流子被电极收集形成光电流, 即自供电现象. 当施加正偏压时, 耗尽层变薄, 光电流 (I_{photo}) 增加. 相反, 在反向偏置下, 耗尽层增厚, 此时可以将光电二极管视作电容, 暗电流 (I_{dark}) 随之降低, 有助于在低光照条件下工作.

4 结 论

本文介绍了一种基于 GaN/ $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 异质结的光电二极管紫外探测器. 在正偏压和负偏压驱动下, 探测器均对 365 nm 的紫外光有响应, 在正偏压下, 响应度 (R) 和外量子效率 (EQE) 更为理想, 可以达到 60 mA/W 和 20%. 得益于异质结界面处形成的内建电场, 探测器可以在自供电模式下工作. 在内建电场的驱动下, 探测器仍可以稳定运行, 且拥有较快的响应速度, 通过指数弛豫方程提取出的上升和下降时间分别为 0.12 s 和 0.13 s. 本文所提出的基于 GaN/ $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 异质结的紫外探测器性能还有很大的提升空间, 可以通过对异质结的界面进行优化或者改进电极的制作工艺等方法减少表面缺陷, 提升器件性能. 总之, 本文的研究证明了基于 GaN/ $(\text{BA})_2\text{PbI}_4$ 异质结的自供电紫外光电二极管拥有广阔的发展前景, 为智能光电系统的发展提供新的思路.

感谢南京航空航天大学物理学院姜明明教授的讨论.

参考文献

- [1] Zhang S, Wei S, Liu Z, Li T, Li C, Huang X L, Wang C, Xie Z, Al-Hartomy O A, Al-Ghamdi A A, Wageh S, Gao J, Tang Y, Wang H, Wang Q, Zhang H 2022 *Mater. Today Phys.* **27** 100812
- [2] Xie C, Lu X T, Tong X W, Zhang Z X, Liang F X, Liang L, Luo L B, Wu Y C 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1806006
- [3] Monroy E, Omnès F, Calle F 2003 *Semicond. Sci. Technol.* **18** R33
- [4] Zheng W, Huang F, Zheng R, Wu H 2015 *Adv. Mater.* **27** 3921
- [5] Liu Z, Tang W 2023 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56** 093002
- [6] Su L, Yang W, Cai J, Chen H, Fang X 2017 *Small* **13** 1701687
- [7] Jiang W Y, Liu Z, Li S, Yan Z Y, Lu C L, Li P G, Guo Y F, Tang W H 2021 *IEEE Sens. J.* **21** 18663
- [8] Zhao B, Wang F, Chen H, Zheng L, Su L, Zhao D, Fang X 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1700264
- [9] Song W, Chen J, Li Z, Fang X 2021 *Adv. Mater.* **33** 2101059
- [10] Zuo C, Cai S, Li Z, Fang X 2021 *Nanotechnology* **33** 105202
- [11] Li L, Liu Z, Tang K, Sha S L, Zhang S H, Jiang M M, Zhang M L, Bian A, Guo Y F, Tang W H 2023 *IEEE Sens. J.* **23** 12767
- [12] Lan Z, Lei Y, Chan W K E, Chen S, Luo D, Zhu F 2020 *Sci. Adv.* **6** eaaw8065
- [13] Hu X, Liu H, Wang X, Zhang X, Shan Z, Zheng W, Li H, Wang X, Zhu X, Jiang Y, Zhang Q, Zhuang X, Pan A 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800293
- [14] Lan Z, Lau Y S, Cai L, Han J, Suen C W, Zhu F 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2100602
- [15] Sun W M, Sun B Y, Li S, Ma G L, Gao A, Jiang W Y, Zhang M L, Li P G, Liu Z, Tang W H 2022 *Chin. Phys. B* **31** 024205
- [16] Ma G, Jiang W, Sun W, Yan Z, Sun B, Li S, Zhang M, Wang X, Gao A, Dai J, Liu Z, Li P, Tang W 2021 *Phys. Scr.* **96** 125823
- [17] Xu T, Jiang M, Wan P, Liu Y, Kan C, Shi D 2023 *J. Mater. Sci. Technol.* **138** 183
- [18] Tang K, Jiang M, Yang B, Xu T, Liu Z, Wan P, Kan C, Shi D 2023 *Nanoscale* **15** 2292
- [19] Li L, Ye S, Qu J, Zhou F, Song J, Shen G 2021 *Small* **17** 2005606
- [20] Lee J, Baek K, Lee J, Ahn H, Kim Y, Lim H, Kim Y, Woo J, Stranks S D, Lee S K, Siringhaus H, Kang K, Lee T 2023 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2302048
- [21] Xia J, Gu H, Liang C, Cai Y, Xing G 2022 *J. Phys. Chem. Lett.* **13** 4579
- [22] Senthil Kumar M, Kumar J 2003 *Mater. Chem. Phys.* **77** 341
- [23] Cao D H, Stoumpos C C, Farha O K, Hupp J T, Kanatzidis M G 2015 *J. Am. Chem. Soc.* **137** 7843
- [24] Lin Y, Bai Y, Fang Y, Chen Z, Yang S, Zheng X, Tang S, Liu Y, Zhao J, Huang J 2018 *J. Phys. Chem. Lett.* **9** 654
- [25] Xia J, Liang C, Gu H, Mei S, Cai Y, Xing G 2022 *ACS Appl. Electron. Mater.* **4** 1939
- [26] Liu Z, Du L, Zhang S H, Li L, Xi Z Y, Tang J C, Fang J P, Zhang M L, Yang L L, Li S, Li P G, Guo Y F, Tang W H 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 5595
- [27] Zhu H, Shan C X, Yao B, Li B H, Zhang J Y, Zhao D X, Shen D Z, Fan X W 2008 *J. Phys. Chem. C* **112** 20546
- [28] Mishra M, Gundimeda A, Krishna S, Aggarwal N, Goswami L, Gahtori B, Bhattacharyya B, Husale S, Gupta G 2018 *ACS Omega* **3** 2304
- [29] Lee C T, Lin T S, Lee H Y 2010 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **22** 1117
- [30] Prakash N, Singh M, Kumar G, Barvat A, Anand K, Pal P, Singh S P, Khanna S P 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 242102
- [31] Zhou H, Gui P, Yang L, Ye C, Xue M, Mei J, Song Z, Wang H 2017 *New J. Chem.* **41** 4901
- [32] Wang S L, Wang Y C, Guo D Y, Li C R, Liu A P 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 128502 (in Chinese) [王顺利, 王亚超, 郭道友, 李超荣, 刘爱萍 2021 物理学报 **70** 128502]

Self-powered dual-mode UV detector based on GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction*

Zhang Sheng-Yuan¹⁾ Xia Kang-Long¹⁾ Zhang Mao-Lin^{1)†} Bian Ang^{2)‡}
Liu Zeng^{1)3)††} Guo Yu-Feng¹⁾ Tang Wei-Hua¹⁾

1) (College of Integrated Circuit Science and Engineering (Industry-Education Integration School), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

2) (School of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

3) (Hangzhou Xiaoshan Technician College, Hangzhou 311201, China)

(Received 25 October 2023; revised manuscript received 14 December 2023)

Abstract

As an important part of an intelligent photoelectric system, ultraviolet detector has been widely used in many fields in recent years. The research on self-powered heterojunction photodiode is particularly important. In this work, a dual-mode self-powered GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction ultraviolet photodiode is prepared and discussed. The GaN film is deposited on sapphire by metal-organic chemical vapor deposition, and then the (BA)₂PbI₄ film is spin-coated onto the surface of the GaN film to construct a planar heterojunction detector. The X-ray diffraction, energy-dispersive X-ray spectroscopy mapping and scanning electron microscope measurements are used to determine the quality of GaN and (BA)₂PbI₄ thin films. When the film is illuminated by 365 nm light with a power density of 421 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ at 5 V bias, the responsiveness (R) and external quantum efficiency (EQE) are 60 mA/W and 20%, respectively. In self-powered mode, the rise time (τ_r) and decay time (τ_d) are 0.12 s and 0.13 s, respectively, illustrating the fast photogeneration process and recombination process for photo-excited electron-hole pairs. And, the R is 1.96×10^{-4} mA/W, owing to the development of space charge region across the interface of GaN thin film and (BA)₂PbI₄ thin film. The outcomes of this study unequivocally demonstrate the extensive potential and wide-ranging applicability of self-powered UV photodiodes based on the GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction configuration. Moreover, this research presents a new concept that provides a novel avenue to the ongoing development of intelligent optoelectronic systems.

Keywords: wide band gap semiconductor, perovskite, heterojunction, self-powered ultraviolet detector

PACS: 73.40.Lq, 85.60.Gz, 95.85.Mt

DOI: 10.7498/aps.73.20231698

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFB3605404), the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U23A20349), the Young Scientist Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62204125, 62304113, 62305135), and the Natural Science Research Start-up Foundation of Recruiting Talents of Nanjing University of Posts and Telecommunications, China (Grant Nos. XK1060921115, XK1060921002).

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

‡ Corresponding author. E-mail: angbian@just.edu.cn

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

基于GaN/(BA)₂PbI₄异质结的自供电双模式紫外探测器

张盛源 夏康龙 张茂林 边昂 刘增 郭宇锋 唐为华

Self-powered dual-mode UV detector based on GaN/(BA)₂PbI₄ heterojunction

Zhang Sheng-Yuan Xia Kang-Long Zhang Mao-Lin Bian Ang Liu Zeng Guo Yu-Feng Tang Wei-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 067301 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231698

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231698>

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

NiO/GaN p-n结紫外探测器及自供电技术

NiO/GaN p-n junction ultraviolet photodetector and self-powered technology

物理学报. 2021, 70(12): 128502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210154>

多孔GaN/CuZnS异质结窄带近紫外光电探测器

Narrowband near-ultraviolet photodetector fabricated from porous GaN/CuZnS heterojunction

物理学报. 2022, 71(21): 218501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220990>

异质结构在光伏型卤化物钙钛矿光电转换器件中的应用

Application of heterostructures in halide perovskite photovoltaic devices

物理学报. 2020, 69(16): 167804 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200591>

基于自准直效应的光子晶体异质结偏振分束器

Heterojunction polarization beam splitter based on self-collimation in photonic crystal

物理学报. 2018, 67(3): 034204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171815>

单个CsPbBr₃钙钛矿量子点的荧光闪烁特性

Photoluminescence blinking properties of single CsPbBr₃ perovskite quantum dots

物理学报. 2021, 70(20): 207802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210908>

基于N型纳米晶硅氧电子注入层的钙钛矿发光二极管

Perovskite light-emitting diodes based on n-type nanocrystalline silicon oxide electron injection layer

物理学报. 2019, 68(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190258>