

关于  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  同型异质结的双波段、  
双模式紫外探测性能分析\*李磊<sup>1)</sup> 支钰崧<sup>4)</sup> 张茂林<sup>1)2)</sup> 刘增<sup>1)2)†</sup> 张少辉<sup>3)‡</sup> 马万煜<sup>1)</sup>  
许强<sup>1)</sup> 沈高辉<sup>1)</sup> 王霞<sup>5)</sup> 郭宇锋<sup>1)2)</sup> 唐为华<sup>1)2)††</sup>

1) (南京邮电大学集成电路科学与工程学院, 氧化镓半导体创新中心, 南京 210023)

2) (南京邮电大学, 射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 南京 210023)

3) (深圳大学物理与光电工程学院, 微纳光电子学研究院, 深圳 518060)

4) (中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

5) (山西工程技术学院电气与控制工程系, 阳泉 045000)

(2022 年 9 月 5 日收到; 2022 年 9 月 26 日收到修改稿)

鉴于紫外探测器在诸多领域的重要应用, 探寻自供电型探测器以及挖掘其内在运行机理显得尤为关键. 本文制备的  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结紫外探测器能够实现对 254 nm 波长 (UVC 波段) 和 365 nm (UVA 波段) 波长紫外光的敏感探测, 并在不同方向的偏压驱动下能够实现耗尽模式和光电导模式的光探测. 这里介绍的基于  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结的双波段、双模式紫外光电探测器具有理想的暗电流和光响应特性; 在 5 和 -5 V 偏压下, 在 254 nm 光照射下的光响应度分别为 2.09 和 66.32 mA/W, 在 365 nm 光照射下的光响应度分别为 0.22 和 34.75 mA/W. 并且仅在内建电场的作用下能够自供电运行, 对 254 和 365 nm 波长紫外光的光响应度为 0.13 和 0.01 mA/W. 进一步, 除对材料与器件性能的特征与解析, 本文还从异质结探测器的运行机理上分析了其双波段与双模式探测特性.

**关键词:** 异质结, 深紫外探测, 双波段, 双模式**PACS:** 73.40.Lq, 85.60.Gz, 95.85.Mt**DOI:** 10.7498/aps.72.20221738

## 1 引言

紫外光电探测器是先进通讯、火警探测、空气净化以及臭氧监测等领域中重要的元器件之一<sup>[1]</sup>. 目前, 硅 (Si) 基探测器已经相对成熟, 但往往需要高透过率的滤波器和荧光材料阻挡低能光子以提

升效率<sup>[2]</sup>, 这样就会增加器件加工与运行的成本. 宽禁带半导体由于其能带上的天然优势能够在无需材料或器件的特殊处理的情况下实现紫外探测<sup>[3]</sup>, 并且随着材料生长技术的进步与器件加工能力的提升, 宽禁带半导体材料的获取也越来越容易<sup>[4]</sup>, 宽禁带半导体紫外探测器件也因此取得了很大的进展<sup>[5-8]</sup>. 氧化镓 ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) 作为一种典型的宽禁带

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 62204125)、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)、山西省基础研究计划 (批准号: 20210302123388) 和山西省高等学校科技创新项目 (批准号: 2021L588) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [zengliu@njupt.edu.cn](mailto:zengliu@njupt.edu.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [shzhang2016@sinano.ac.cn](mailto:shzhang2016@sinano.ac.cn)

†† 通信作者. E-mail: [whtang@njupt.edu.cn](mailto:whtang@njupt.edu.cn)

半导体材料, 其禁带宽度为 4.9 eV 左右, 化学及热力学性质稳定, 在深紫外探测领域受到了越来越多的重视. 基于  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基深紫外探测器, 各种器件结构与优化手段被用来优化提升探测器的性能.

具体地, Qian 等<sup>[9]</sup>利用局域表面等离子共振的方法, 引入  $\text{Al@Al}_2\text{O}_3$  核壳纳米阵列结构使  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基深紫外探测器的光响应度 (responsivity,  $R$ ) 达到 216 A/W, 探测度 (detectivity,  $D^*$ ) 达到  $4.22 \times 10^{15}$  Jones. Liu 等<sup>[10]</sup>通过构建非对称势垒的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基肖特基结, 不仅获得了超高的深紫外光响应性能, 探测器还能在无源状态 (零偏压) 下稳定运行, 这种依赖于内建电场驱动的自供电工作模式使其  $R$  达到了 0.73 mA/W,  $D^*$  达到了  $3.35 \times 10^{10}$  Jones. 此外, 由于表面俘获效应的存在,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  深紫外探测器的持续光电导效应与增益循环机制也被研究并报道<sup>[11,12]</sup>.

就绝大多数电子、光电子器件而言, 异质结的构建由于不同的禁带宽度以及不连续的能带会带来诸多新奇物理现象与器件性能的改善<sup>[13–16]</sup>. 界面的质量对异质结器件起着至关重要的决定性作用<sup>[15]</sup>, 在很大程度上, 我们甚至可以将界面称为器件<sup>[13]</sup>. 对于  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基深紫外探测器, 已经有一些异质结构的报道; 比如, 异质结的构建对探测性能的提升<sup>[17,18]</sup>, 自供电运行模式的促成<sup>[19,20]</sup>, 以及宽带探测的实现<sup>[21,22]</sup>等.  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  与  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  都属于宽禁带半导体材料; 鉴于宽禁带半导体的材料特性, 该工作组构建了基于全宽禁带半导体的异质结构. 就  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基探测器而言, 已经报道的  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$  异质结探测器的性能优异<sup>[23,24]</sup>,  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  与  $\text{GaN}$  具有相近的晶格结构和原子间距, 故本文将利用射频磁控溅射技术构建  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  薄膜异质结, 在

对材料做出基础表征的前提下来探讨该异质结探测器的紫外光电传感特性, 并就其双波段探测和双工作模式展开细致分析.

## 2 实验方法

首先, 利用金属有机化学气相沉积 (metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD) 技术在  $c$  面蓝宝石衬底上生长  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  薄膜, 然后利用射频磁控溅射技术在  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  薄膜上再沉积  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜. 在获得  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  平面异质结的基础上, 通过机械转移的方法将铟 (In) 金属圆柱形小块分别转移到  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  和  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的表面以作为电极, 通过光学显微镜测量得到异质结探测器的有效光照面积约为  $1.00 \text{ mm}^2$ , 相应的探测器结构示意图如图 1(b) 所示.

为了检验本工作中所制备的薄膜材料的晶体质量, 采用 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 和紫外-可见光吸收光谱 (UV-Visible absorption spectroscopy) 加以验证. 进一步, 为了表征此异质结光电探测器的紫外光电响应特性, 利用 keysight 1505A 半导体测试仪器来完成, 并辅助以能够发射 254 和 365 nm 紫外的光源来辐照样品.

## 3 结果分析

如图 1(a) 所示, 其为  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结的 XRD 图谱, 结果显示有  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  的 (001) 和 (002) 衍射峰<sup>[25]</sup>,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  的 (110) 衍射峰 ( $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ), 以及  $c$  面蓝宝石衬底的 (0006) 衍射峰. 一般, 文献报道的衬底衍射峰要比生长的薄膜衍射峰尖锐,

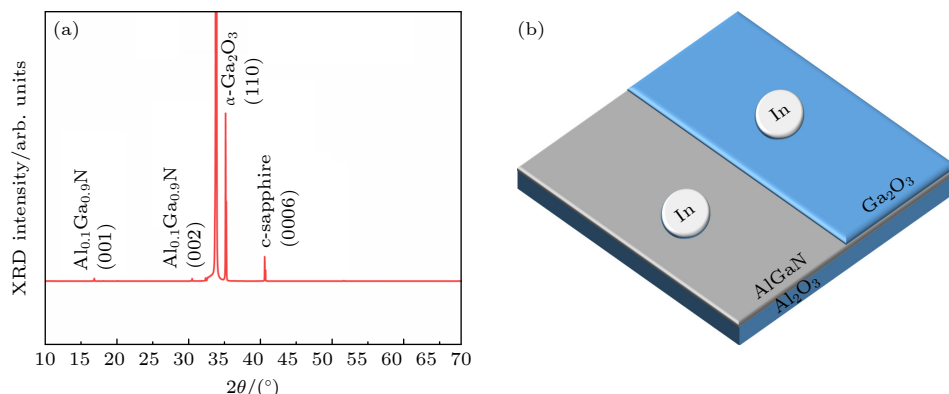


图 1  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结 (a) X 射线衍射图谱; (b) 相应的紫外光电探测器结构示意图

Fig. 1. (a) The XRD pattern of the  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  heterojunction, and (b) its schematic diagram of the UV photodetector.

这里衬底衍射峰低于制备的薄膜衍射峰, 可能是由于我们使用的  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  薄膜厚度高达  $5\text{ }\mu\text{m}$  并对衬底衍射起到了一定的掩盖的缘故. 利用上述介绍的薄膜异质结构, 制备的  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结紫外光电探测器如图 1(b) 所示.

本文所制备的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  与  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  薄膜的吸收光谱 (测试波长介于  $190$  到  $900\text{ nm}$  之间) 如图 2(a) 和图 2(b) 所示; 从这个结果, 能够明显看出  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  薄膜分别对 UVC, UVA 波段的紫外光表现出了明显的强吸收能力, 然而对于可见光波段基本无吸收, 据此可以推断  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结本质上是可以实现 UVA/UVC 双波段紫外光吸收, 体现该异质结探测器的双波段探测能力. 对变量  $(\alpha hv)^2$  与光子能量  $(hv)$  的函数曲线采取外推法 [如图 2(a) 和图 2(b) 内插图所示] 计算得到  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  与  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  的光学带隙 ( $E_g$ ) 分别约为  $5.11$  和  $3.58\text{ eV}$ , 其拟合曲线的 Tauc 函数表达式为

$$(\alpha hv)^2 = C(hv - E_g), \quad (1)$$

其中  $E_g$  为带隙;  $C$  为常数;  $\alpha$  为吸收系数;  $h$  为普朗克常数;  $v$  为入射光频率. 本工作获得的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  与  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  的光学带隙值与文献报道基本一致 [4,25].

图 3 所示为  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结光电探测器在暗条件以及不同光照强度 (波长为  $365$  和  $254\text{ nm}$ ) 辐照下的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 关系图, 可以看出该异质结探测器在暗条件下表现出了良好的整流特性, 这样在反向偏压下更易获得低噪声的光电探测. 在  $254\text{ nm}$  紫外光照射下整流比也仅为  $40$ , 在  $365\text{ nm}$  紫外光照射下整流比约为  $100$ ; 探测器在暗条件下具有较低的暗电流 (dark current,  $I_{\text{dark}}$ ); 在  $+5$  和  $-5\text{ V}$  电压的驱动下,  $I_{\text{dark}}$  分别为  $68.74$  和  $5.32\text{ pA}$ , 较低的  $I_{\text{dark}}$  将引入更小的噪声影响和更高的灵敏度 (假设将  $I_{\text{dark}}$  作为探测器噪声的主要来源). 其光暗电流比 (photo-to-dark current ratio, PDCR) 在波长为  $254\text{ nm}$  (UVC), 相应的

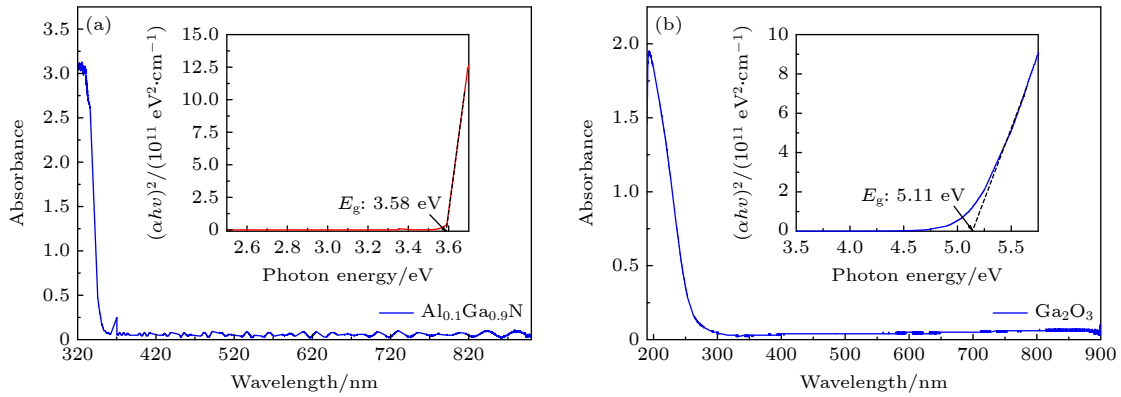


图 2 (a)  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  薄膜和 (b)  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的紫外-可见光吸收光谱, 相应的内插图分别为  $(\alpha hv)^2$  与  $(hv)$  的函数关系曲线

Fig. 2. UV-vis absorbance spectrum of the (a)  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  and (b)  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films. The corresponding insets are the functions of  $(\alpha hv)^2$  versus  $hv$ , respectively.

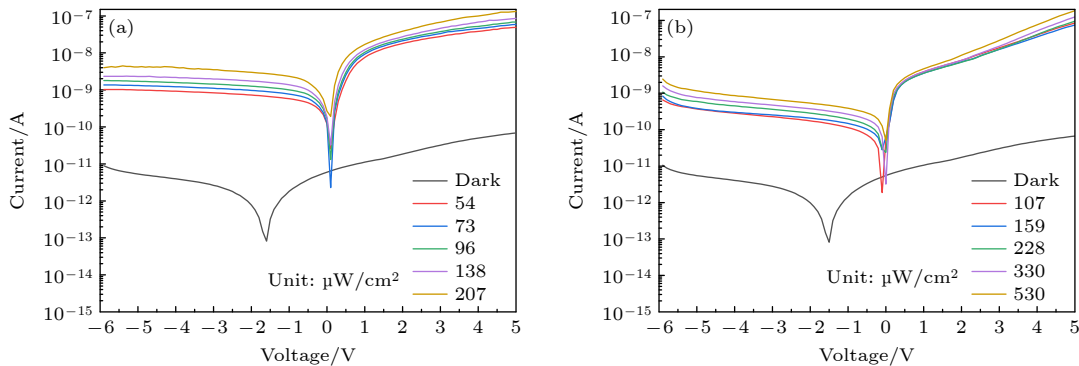


图 3  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结光电探测器的对数形式的  $I$ - $V$  特性曲线 (a) 暗条件与  $254\text{ nm}$  波长紫外光辐照; (b) 暗条件与  $365\text{ nm}$  波长紫外光辐照

Fig. 3. The semi-log  $I$ - $V$  curves of the  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  heterojunction photodetector: (a) In the dark under  $254\text{ nm}$  light illumination; (b) in the dark and under  $365\text{ nm}$  light illumination.

光强为  $207 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时高达  $1.93 \times 10^3$ ; 而在波长为  $365 \text{ nm}$ (UVA), 相应的光强为  $530 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光照下, PDCR 高达  $7.92 \times 10^3$ , 较大的 PDCR 展现出了这里介绍的异质结光电探测器对  $254$  和  $365 \text{ nm}$  波长的紫外光都具有很强的敏感性, 体现出了该  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结探测器具有双波段 (dual-band) 探测的能力.

这里, 用  $R$ ,  $D^*$  和外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 这三项衡量光电探测器的重要指标来表征探测器性能, 其公式如下 [26]:

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

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

$$\text{EQE} = \frac{hcR}{q\lambda} \times 100\%, \quad (4)$$

其中  $P$  为入射光强;  $q$  为电荷量 ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ );  $S$  为有效光照面积;  $h$  为普朗克常量 ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ );  $c$  为光速;  $\lambda$  为入射光的波长 (本文为  $254$  和  $365 \text{ nm}$ ). 另外, 通过对图 3 的观察, 很明显可以看到, 在反向偏压下其为截止状态, 在正向偏压下其为导通状态. 这类探测器在执行光探测时, 不同方向偏压下的运行机理不同, 探测器在反向和正向偏压下的运行模式分别为耗尽模式和光电导模式, 光电导模式探测器类似于一个光敏电阻, 其输运机制通常用电子隧穿理论描述. 对于 N-N 异质结而言, 由于能带阶跃和能带弯曲, 也会在界面形成尖峰势垒, 所以耗尽模式下的载流子输运也可以用热电子理论解释 [27,28].

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_B}{k_B T}\right), \quad (6)$$

其中  $I_0$  为饱和电流;  $A$  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;  $\varphi_B$  为异质结界面的势垒高度. 由于载流子输运机理的不同, 这个  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结探测器执行的是双模式的探测. 异质结器件由于在正反偏压下的输运机理不同, 因此使得相应的偏压下探测器的工作模式不同, 包括光电导模式和耗尽模式. 光电导模式具有良好的线性关系以及可量化的应用空间. 耗尽模式的  $I_{\text{dark}}$  相对更低, 当将其作为主要噪声来源时, 探测器的  $D^*$  会很高. 根据 (2) 式—(4) 式计算所得, 无论是在正向还是反向偏压下的  $R$ ,  $D^*$  和 EQE 分别被总结在表 1 中, 这就说明这里所介绍的异质结探测器能够实现双波段 ( $254 \text{ nm}$ : UVC,  $365 \text{ nm}$ : UVA)、双模式 (耗尽模式与光电导模式) 的紫外光电探测.

关于自供电型的光电探测器的研究包括运行机理、运行模式和探测波段等. 对于异质结器件而言, 由于形成结的两种不同半导体材料体接触表面会有内建电场的存在, 这就能在不施加偏压的条件下分离电子-空穴对, 故而这类异质结光电探测器可以在无外加电压下稳定工作, 即称为自供电运行. 如图 4 所示, 其为在  $0 \text{ V}$  偏压下的瞬时光响应与光强关系图; 随着光强的增加, 更多的光生载流子被激发, 从而可以输出更大的  $I_{\text{photo}}$ . 这个结果不仅验证了此  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结探测器可以在自

表 1 双波段、双模式  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结光电探测器的性能总结

Table 1. Summary on the performance of the dual-band, dual-mode heterojunction photodetector.

偏压/V	波长 $254 \text{ nm}$			波长 $365 \text{ nm}$		
	$R / (\text{mA}\cdot\text{W}^{-1})$	$D^*/\text{Jones}$	EQE / %	$R / (\text{mA}\cdot\text{W}^{-1})$	$D^*/\text{Jones}$	EQE / %
-5	2.09	$1.60 \times 10^{11}$	1.01	0.22	$1.69 \times 10^{10}$	0.075
-4	2.02	$1.80 \times 10^{11}$	0.97	0.16	$1.44 \times 10^{10}$	0.055
-3	1.17	$1.92 \times 10^{11}$	0.84	0.13	$1.39 \times 10^{10}$	0.044
-2	1.49	$3.00 \times 10^{11}$	0.72	0.10	$2.02 \times 10^{10}$	0.034
-1	1.16	$1.52 \times 10^{11}$	0.66	0.07	$9.53 \times 10^9$	0.025
0	0.13	$9.37 \times 10^9$	0.06	0.01	$6.18 \times 10^8$	0.003
1	8.47	$4.48 \times 10^{11}$	4.07	0.88	$4.68 \times 10^{10}$	0.300
2	19.28	$7.92 \times 10^{12}$	9.25	2.08	$8.54 \times 10^{10}$	0.707
3	33.81	$1.06 \times 10^{12}$	16.23	5.32	$1.66 \times 10^{11}$	1.808
4	49.62	$1.25 \times 10^{12}$	23.98	14.24	$3.56 \times 10^{11}$	4.841
5	66.32	$1.41 \times 10^{12}$	31.84	34.75	$7.42 \times 10^{11}$	11.815



供电模式下工作,也说明了探测器能够响应快速变化的光学信号.此外,在254和365 nm这两种波长紫外光的照射时,在光源开启的瞬间,输出电流都出现了一个明显的上升尖峰,这很可能是由于内建电势与入射紫外光的协调效应导致的,因为在光照下激发的大量光生载流子很难及时地被电极收集<sup>[29–31]</sup>,这一现象在自供电型探测器中相对常见.恰恰由于这里异质结的内建电势很低,更是加剧了电流出现上升尖峰的现象.然而, $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 与 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 都是N型半导体材料,它们构建的异质结属于同

型异质结,即N-N异质结.这意味着其整流特性所能承受的电压范围也小,很容易出现击穿现象.具体可以通过掺杂等技术来调节载流子浓度,进而改善对内建电场的调控.

为了研究不同电压下光电流随光强变化的规律,如图5所示为针对不同波长光照射时不同外加电压下的电流随时间变化图( $I$ - $t$ 图);图5(a)—(d)显示的结果表明,在光强一定时,随着外加电压的增强, $I_{\text{photo}}$ 逐渐增大,这一现象主要是由于随着电压的增加,载流子漂移速度增大,同时更多的电子

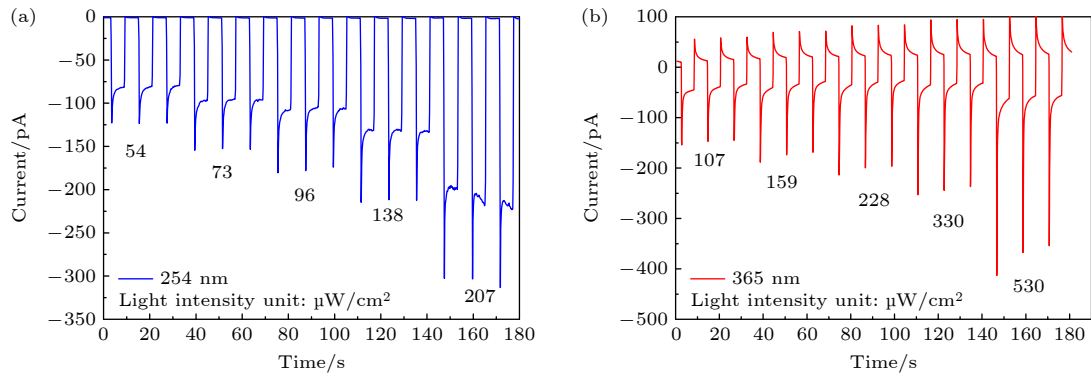


图4 零偏压下 (a) 254 nm 波长紫外光照射下的对数  $I$ - $t$  特性曲线; (b) 365 nm 波长紫外光照射下的对数  $I$ - $t$  特性曲线

Fig. 4. The  $I$ - $t$  curves under (a) 254 nm and (b) 365 nm light illumination at zero bias.

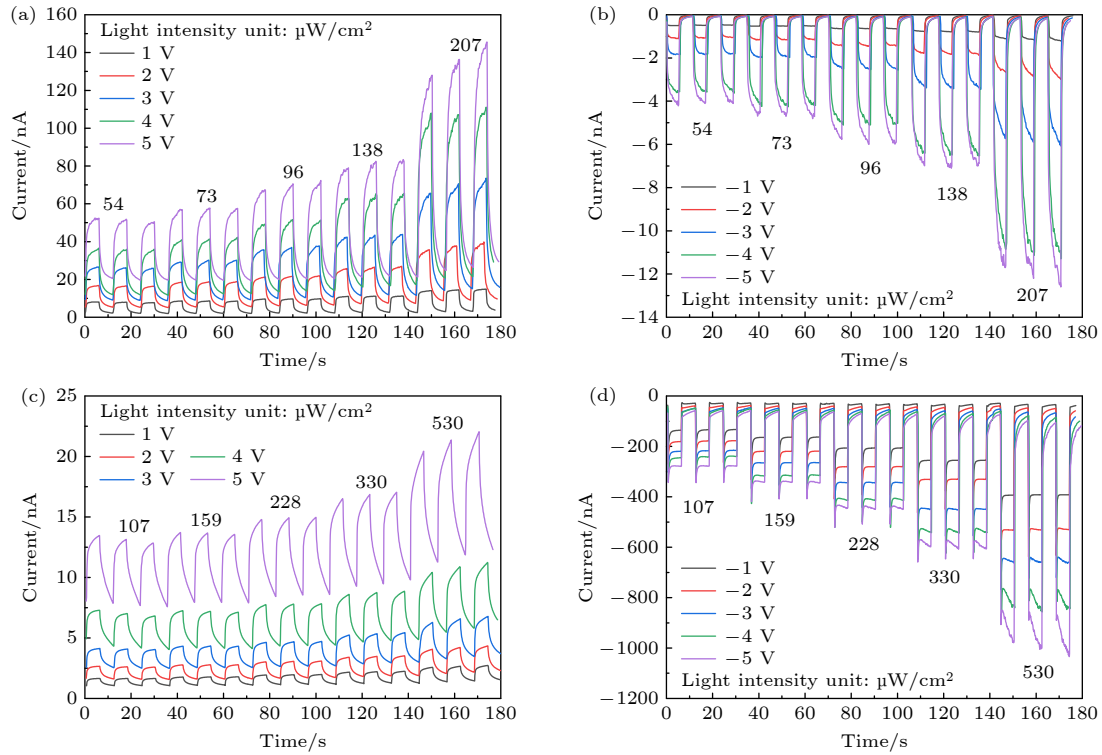


图5 (a) 正向偏压下、(b) 反向偏压下 254 nm 波长光辐照下的  $I$ - $t$  特性曲线; (c) 正向偏压下、(d) 反向偏压下 365 nm 波长光辐照下的  $I$ - $t$  特性曲线

Fig. 5. The  $I$ - $t$  curves at (a) positive voltages and (b) negative voltages under the illuminations of 254 nm UV light. The  $I$ - $t$  curves at (c) positive voltages and (d) negative voltages under the illuminations of 365 nm UV light.

挣脱了界面态陷阱的束缚所造成的. 再者, 考虑到随着光强的增加,  $I_{\text{photo}}$  亦随之增大, 光强的增加致使价带中更多的电子吸收了光子能量 ( $h\nu$ ), 更多的电子跃迁到导带, 形成更高的  $I_{\text{photo}}$ .

如图 6 所示, 根据幂次定律:

$$I_{\text{photo}} \propto P^\theta, \quad (7)$$

其中  $P$  为光照功率密度;  $\theta$  为拟合幂数. 对于本工作制备的探测器件,  $\theta$  并不为 1, 因此可以认为  $I_{\text{photo}}$  与  $P$  呈现出的是近线性关系. 随着电压的施加,  $\theta$  大于 1, 造成这种现象的主要原因是外加电压的作用下, 载流子的漂移速度随之增加并且俘获态电子需要更小的能量便可跃迁至导带, 因此光子的剩余能量可以激发更多的电子跃迁, 形成倍增效应 [32]. 然而如图 6(a) 和图 6(d), 外部施加较小的电压时,  $\theta$  小于 1, 主要是由于较强的光照情况下相比较小光照情况下, 加剧了载流子散射, 导致相对更多的电子与空穴的复合造成的, 因为  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  的光强对应  $10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的入射光子流密度 [32], 更高的光强下会有更多的光子入射到半导体的表面, 也就会有更多的光生电子-空穴对产生, 当达到一

定的量时会有明显的散射现象出现 [32].

为了更好地阐释异质结光电探测器的载流子输运机制, 结合相应半导体的能带位置 [33,34],  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结的能带结构示意图如图 7 所示; 当  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  接触时, 由于电子的扩散运动, 电子将从  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  一侧流向  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  一侧, 并在接触表面形成空间电荷区, 产生内建电场. 由于界面处会存在一定量的俘获态, 接触时电子会从  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  一侧流向  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  一侧,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  一侧失去了电子导致电势上升而能带向上弯曲, 界面处会在靠近  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  一侧俘获一定量的电子形成耗尽区, 因此耗尽区位于靠近  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  一侧. 在无外部光源的激励下, 电子-空穴是相对匮乏的, 此时的  $I_{\text{dark}}$  相对低. 当用 254 nm 波长的紫外光照射时, 光子能量大于  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  禁带宽度的光子会使得  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  价带的电子吸收足够的能量进而跃迁到导带. 然而在 365 nm 波长紫外光的照射下, 其能量只能激发  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  价带上的电子跃迁, 故而 254 nm 波长光照射产生的  $R$  大于 365 nm 波长光照射产生的  $R$ . 不同波长照射下产生的光生载流子被内建电场迅速地分离, 并

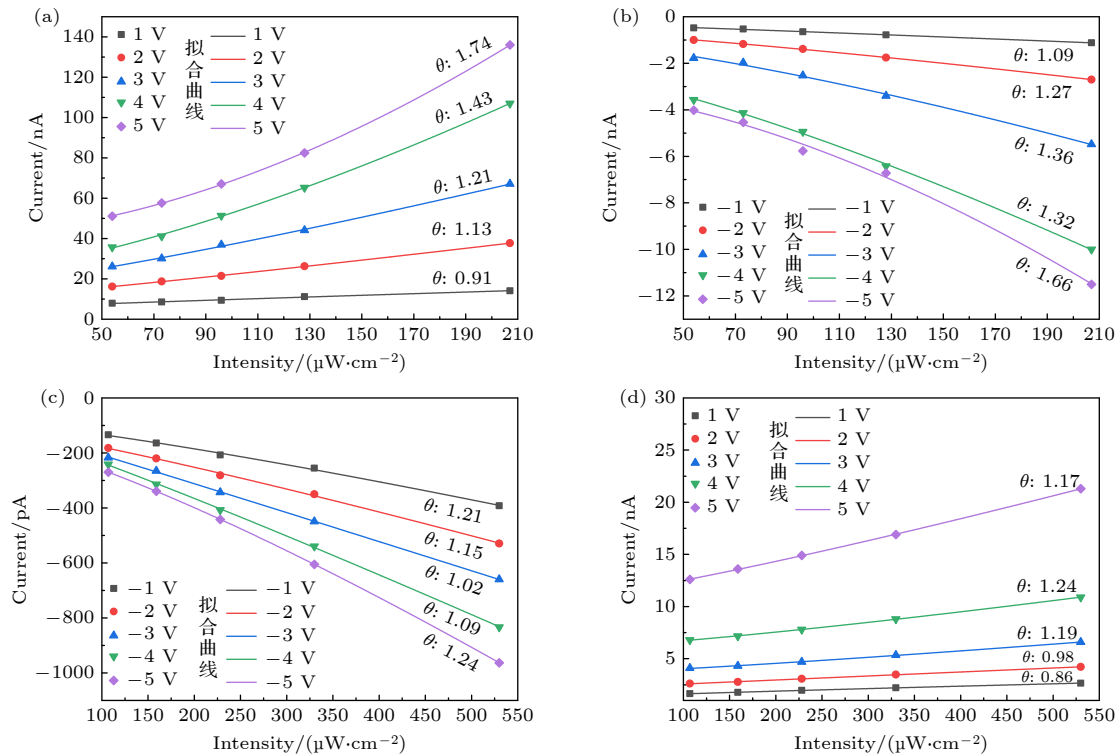


图 6 254 nm 波长紫外光辐照下, 施加 (a) 正向偏压与 (b) 负偏压下的光电流与光强的关系图. 365 nm 波长紫外光辐照下, 施加 (c) 正向偏压与 (d) 负偏压下的光电流与光强的关系图

Fig. 6. The intensity dependent photocurrent at (a) positive voltages and (b) negative voltages under illumination of 254 nm UV light. The intensity dependent photocurrent at (c) positive voltages and (d) negative voltages under illumination of 365 nm UV light.

被电极收集从而形成输出的  $I_{\text{photo}}$ . 当施加正向偏压时, 耗尽区受到抑制, 导致  $I_{\text{photo}}$  增大; 当施加反向偏压时, 耗尽区被增强, 出现相反的情况, 导致较低的反向漏电电流.

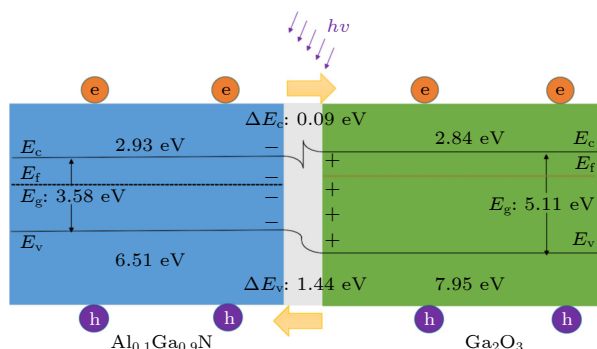


图 7  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结能带结构示意图

Fig. 7. The band diagram of the  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  hetero-junction photodetector.

## 4 结 论

本文介绍了一个  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  异质结, 并以此来执行紫外光探测. 结果表明, 该异质结探测器能够实现双波段、双模式的光探测工作. 异质结界面处形成的内建电场更是使得该异质结探测器能够在零偏压下稳定的自供电运行. 在正偏压和负偏压驱动下, 探测器都能对 254 nm 波长紫外光和 365 nm 波长紫外光展现出理想的光响应度. 内建电场的有效驱动使其能够在无源时依然稳定运行, 对 254 和 365 nm 波长紫外光的光响应度分别为 0.13 和 0.01 mA/W. 本工作系统介绍了基于宽禁带半导体的异质结紫外探测器的性能特征, 并给出了响应的理论分析. 整体而言, 目前这个异质结探测器的性能还存在很大的提升空间, 比如界面优化, 材料生长质量的改善, 器件工艺的改进等.

## 参考文献

- [1] Chen H, Liu K, Hu L, Al-Ghamdi A A, Fang X 2015 *Mater. Today* **18** 493
- [2] Shi L, Nihitjanov S 2012 *IEEE Sensors J.* **12** 2453
- [3] Monroy E, Omnes F, Calle F 2003 *Semicond. Sci. Technol.* **18** R33
- [4] Pearton S J, Yang J, Cary IV P H, Ren F, Kim J, Tadjer M J, Mastro M A 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 011301
- [5] Chen X, Ren F, Gu S, Ye J 2019 *Photonics Res.* **7** 381

- [6] Higashiwaki M 2021 *Phys. Status Solidi RRL* **15** 2100357
- [7] Liu Z, Li L, Zhi Y S, Du L, Fang J P, Li S, Yu J G, Zhang M L, Yang L L, Zhang S H, Guo Y F, Tang W H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 208501 (in Chinese) [刘增, 李磊, 支钰崧, 都灵, 方君鹏, 李山, 余建刚, 张茂林, 杨莉莉, 张少辉, 郭宇峰, 唐为华 2022 物理学报 **71** 208501]
- [8] Xu J, Zheng W, Huang F 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 8753
- [9] Qian L, Li W, Gu Z, Tian J, Huang X, Lai P T, Zhang W 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2102055
- [10] Liu Z, Wang X, Liu Y, Guo D, Li S, Yan Z, Tan C, Li W, Li P, Tang W 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 13920
- [11] Liu Z, Du L, Zhang S, Li L, Xi Z, Tang J, Fang J, Zhang M, Yang L, Li S, Li P, Guo Y, Tang W 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 5595
- [12] Liu Z, Zhi Y, Zhang M, Yang L, Li S, Yan Z, Zhang S, Guo D, Li P, Guo Y, Tang W 2022 *Chin. Phys. B* **31** 088503
- [13] Kroemer H 1963 *Proc. IEEE* **51** 1782
- [14] Robertson J 2000 *J. Vac. Sci. Technol., B* **18** 1785
- [15] Liu Z, Liu Y, Wang X, Li W, Zhi Y, Wang X, Li P, Tang W 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 045707
- [16] Chen Y, Yang X, Zhang C, He G, Chen X, Qiao Q, Zang J, Dou W, Sun P, Deng Y, Dong L, Shan C 2022 *Nano Lett.* **22** 4888
- [17] Liu Z, Zhang S, Zhi Y, Li S, Yan Z, Chu X, Bian A, Li P, Tang W 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 195104
- [18] Qi X, Yue J, Ji X, Liu Z, Li S, Yan Z, Zhang M, Yang L, Li P, Guo D, Guo Y, Tang W 2022 *Thin Solid Films* **757** 139397
- [19] Zheng Z, Wang W, Wu F, Wang Z, Shan M, Zhao Y, Liu W, Jian P, Dai J, Lu H, Chen C 2022 *Opt. Express* **30** 21822
- [20] Gao A, Jiang W, Ma G, Liu Z, Li S, Yan Z, Sun W, Zhang S, Tang W 2022 *Curr. Appl. Phys.* **33** 20
- [21] 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
- [22] Sun W, Sun B, Li S, Ma G, Gao A, Jiang W, Zhang M, Li P, Liu Z, Tang W 2022 *Chin. Phys. B* **31** 024205
- [23] Nakagomi S, Sato T, Takahashi Y, Kokubun Y 2015 *Sens. Actuators, A* **232** 208
- [24] Weng W Y, Hsueh T J, Chang S J, Huang G J, Hsueh H T 2011 *IEEE Sensors J.* **11** 1491
- [25] Wang L X, Chen X K, Wang D, Cao S Z 2009 *Vac. Cryogenics* **15** 5 (in Chinese) [王兰喜, 陈学康, 王瑞, 曹生珠 2009 真空与低温 **15** 5]
- [26] Razeghi M, Rogalski A 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 7433
- [27] Tung R T 2014 *Appl. Phys. Rev.* **1** 011304
- [28] Liu Z, Zhi Y, Li S, Liu Y, Tang X, Yan Z, Li P, Li X, Guo D, Wu Z, Tang W 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 085105
- [29] Li S, Guo D, Li P, Wang X, Wang Y, Yan Z, Liu Z, Zhi Y, Huang Y, Wu Z, Tang W 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 35105
- [30] 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
- [31] Xu X, Chen J, Cai S, Long Z, Zhang Y, Su L, He S, Tang C, Liu P, Peng H, Fang X 2018 *Adv. Mater.* **30** 1803165
- [32] Garrido J A, Monroy E, Izpura I, Muñoz E 1998 *Semicond. Sci. Technol.* **13** 563
- [33] Grabowski S P, Schneider M, Nienhaus H, Mönch W, Dimitrov R, Ambacher O, Stutzmann M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2503
- [34] Ma J, Zheng M, Chen C, Zhu Z, Zheng X, Chen Z, Guo Y, Liu C, Yan Y, Fang G 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1804128

# Dual-band and dual-mode ultraviolet photodetection characterizations of $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ homo-type heterojunction<sup>\*</sup>

Li Lei<sup>1)</sup>    Zhi Yu-Song<sup>4)</sup>    Zhang Mao-Lin<sup>1)2)</sup>    Liu Zeng<sup>1)2)</sup>†  
 Zhang Shao-Hui<sup>3)</sup>‡    Ma Wan-Yu<sup>1)</sup>    Xu Qiang<sup>1)</sup>    Shen Gao-Hui<sup>1)</sup>  
 Wang Xia<sup>5)</sup>    Guo Yu-Feng<sup>1)2)</sup>    Tang Wei-Hua<sup>1)2)</sup>††

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

2) (*National and Local Joint Engineering Laboratory for RF Integration and Micro-Assembly Technologies, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

3) (*Institute of Microscale Optoelectronics, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

4) (*China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China*)

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

(Received 5 September 2022; revised manuscript received 26 September 2022)

## Abstract

The deep-ultraviolet (DUV) photodetectors (PDs) have important applications in lots of fields. Thus, developing self-powered DUV PDs and excavating the inherent mechanism seem seriously crucial to achieving further actual applications. The construction of heterojunction can lead to many desired characteristics in optoelectronic devices. In the field of DUV photodetection,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  has been a popular subject for constructing DUV PDs. So, it is necessary to develop self-powered  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -based DUV PDs through fabricating its heterogeneous structure. Therefore, in this work, the  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  heterojunction DUV PD is fabricated and discussed, which can achieve 254 and 365 nm DUV light photodetection. At positive voltages and negative voltages, the heterojunction PD can operate in a photoconductive mode or a depletion mode, respectively. In view of the PD performance, it displays decent dark current and DUV photoresponses. At voltage of 5 and  $-5$  V, under 254 nm DUV light illumination, the photoresponsivity ( $R$ ) is 2.09 and 66.32 mA/W, respectively, while under 365 nm DUV light illumination,  $R$  is 0.22 and 34.75 mA/W, respectively. In addition, under the built-in electric field ( $E_{\text{built-in}}$ ),  $R$  is 0.13 and 0.01 mA/W for 254 nm and 365 nm DUV light illumination, respectively. In all, the fabricated heterojunction PD displays promising prospects in the coming next-generation semiconductor photodetection technology. The results in this work indicate the potential of  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$

<sup>\*</sup> Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62204125), the Natural Science Research Starting Foundation of Recruiting Talents of Nanjing University of Posts and Telecommunications, China (Grant Nos. XK1060921115, XK1060921002), the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 20210302123388), and the Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutes of Shanxi Province, China (Grant No. 2021L588).

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

‡ Corresponding author. E-mail: [shzhang2016@sinano.ac.cn](mailto:shzhang2016@sinano.ac.cn)

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



heterojunction with high performance DUV photodetection. Furthermore, except for the characterizations of the materials and photodetector, in the end of this paper, the operating mechanism of the dual-band dual-mode heterojunction PD is analyzed through its heterogeneous energy-band diagram. It is concluded that the illustrated dual-band dual-mode  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  heterojunction can be sensitive to UVA waveband and UVC waveband in the electromagnetic spectrum, extending its photodetection region. And, the dual-mode (photoconductive mode and depletion mode) photodetection indicates two kinds of carrier transports in one PD, which can be attributed to the successful construction of the N-N homo-type  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  heterojunction.

**Keywords:** heterojunction, deep-ultraviolet detection, dual-band, dual-mode

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

**DOI:** [10.7498/aps.72.20221738](https://doi.org/10.7498/aps.72.20221738)

关于Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N同型异质结的双波段、双模式紫外探测性能分析

李磊 支钰崧 张茂林 刘增 张少辉 马万煜 许强 沈高辉 王霞 郭宇锋 唐为华

**Dual-band and dual-mode ultraviolet photodetection characterizations of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N homo-type heterojunction**

Li Lei Zhi Yu-Song Zhang Mao-Lin Liu Zeng Zhang Shao-Hui Ma Wan-Yu Xu Qiang Shen Gao-Hui Wang Xia Guo Yu-Feng Tang Wei-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 027301 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221738

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221738>

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

极化控制的双波段宽带红外吸收器研究

Polarization-controlled dual-band broadband infrared absorber

物理学报. 2018, 67(10): 107801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172716>

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>

双明模耦合的双波段类电磁诱导透明研究

Electromagnetic induction-like transparency in dual-band with dual-bright mode coupling

物理学报. 2022, 71(1): 014201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211312>

Cu<sub>2</sub>O/ZnO氧化物异质结太阳能电池的研究进展

Progress of Cu<sub>2</sub>O/ZnO oxide heterojunction solar cells

物理学报. 2018, 67(11): 118401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172037>

具有大光电导增益的氧化镓薄膜基深紫外探测器阵列

Gallium oxide thin film-based deep ultraviolet photodetector array with large photoconductive gain

物理学报. 2022, 71(20): 208501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220859>

结构光照明相位/荧光双模式显微技术

Phase/fluorescence dual-mode microscopy imaging based on structured light illumination

物理学报. 2022, 71(24): 244203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221518>