

基于背入射技术的全透明 β -Ga₂O₃ 多模式 日盲探测实验系统构建*

董典萌¹⁾ 王景晨¹⁾ 徐笑云^{2)†} 彭敏¹⁾ 王泽川¹⁾ 汪成¹⁾ 吴真平¹⁾

1) (北京邮电大学物理科学与技术学院, 北京 100876)

2) (广州城市理工学院珠宝学院, 广州 510800)

(2025 年 7 月 29 日收到; 2025 年 9 月 20 日收到修改稿)

为满足日盲紫外通信等前沿应用对高性能光电探测器的迫切需求, 本文设计并实现了一种基于背入射结构的全透明 β -Ga₂O₃ 日盲光电探测器. 该器件采用射频磁控溅射技术在双面抛光蓝宝石衬底上外延生长高质量 β -Ga₂O₃ 薄膜, 并构筑了能够与 n 型 Ga₂O₃ 形成高效欧姆接触的氧化铟锡 (ITO) 叉指电极. 该结构的核心优势在于利用双抛蓝宝石衬底在深紫外波段的高透过率, 使入射光子绕开紫外区吸收显著的 ITO 电极, 彻底规避了传统正入射模式中由电极遮蔽效应所导致的光子损失. 得益于此, 器件展现出卓越的光电性能, 如高响应度、高探测率与优异的紫外/可见光抑制比. 在此高性能探测器平台基础上, 进一步发掘了该器件的多功能应用潜力. 基于 β -Ga₂O₃ 单斜晶系的本征晶格各向异性, 构建偏振探测实验系统, 器件表现出显著的偏振光敏特性. 同时, 成功搭建了非视距 (NLOS) 紫外通信演示系统, 验证了其在复杂信道下进行高保真信息传输的可行性. 本研究为构建兼具高灵敏度与偏振分辨、非视距通信能力的新一代 Ga₂O₃ 基光电器件提供了有效的物理思路和实验依据, 在安全通信、偏振成像等领域展现出广阔的应用前景.

关键词: Ga₂O₃, 日盲探测器, 偏振探测, 非视距日盲通信

PACS: 52.70.Kz, 84.40.Ua, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.74.20251009

CSTR: 32037.14.aps.74.20251009

1 引言

随着传统无线通信技术面临频谱紧张、干扰严重及环境适应性差等挑战, 深紫外 (UVC) 通信因其独特的传播特性和安全优势成为新一代短距离高保密通信的重要发展方向^[1,2]. 该技术利用 200—280 nm 的“日盲”紫外波段, 其独特的物理特性赋予了通信系统两大核心优势: 其一, 大气对该波段光子的强散射与吸收效应, 构建了天然的非视距 (non-line-of-sight, NLOS) 链路, 并极大地增强

了通信的隐蔽性和抗窃听能力; 其二, 该波段完全不受太阳背景辐射干扰, 保证了全天候、全光照条件下的高信噪比传输. 因此, UVC 通信尤其适用于烟尘环境、灾害救援、战术隐蔽通信等对安全性与环境适应能力要求极高的应用场景^[3,4].

然而, 实现高性能日盲通信的前提在于开发一类能够精准、高效感知深紫外光的光电探测器. 传统的硅基光电二极管 (photodetector, PD)、雪崩光电二极管 (avalanche photodetector, APD) 及 III-V 族半导体基探测器由于带隙较窄、紫外选择性差或制备成本高等问题, 在深紫外波段面临暗电

* 国家自然科学基金 (批准号: 12474065)、信息光子学与光通信国家重点实验室开放基金 (批准号: IPOC2025ZR05) 和北京邮电大学优秀博士生基金 (批准号: CX20253002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuxiaoyun@bnu.edu.cn

流高、响应度低、可见光干扰严重等诸多挑战^[5,6]. 相比之下, 氧化镓 (Ga_2O_3), 尤其是其热力学稳定的 β 相, 由于其超宽禁带 (4.9—5.3 eV)、高击穿场强、优异的抗辐照性及可控的 n 型导电特性, 已成为当前深紫外探测领域最具前景的宽禁带半导体材料之一^[7–11]. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 在 200—280 nm 波段具有强吸收特性, 完全落入日盲区, 使其在高选择性、低背景噪声日盲探测器的构建中表现出极大的材料优势^[12–14].

基于 Ga_2O_3 的日盲紫外光电探测器按器件结构可分为异质结型^[15–17]、肖特基结型^[18,19]和光电导型^[20,21]. 与异质结型和肖特基结型相比, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电导探测器因其结构简单、制备成本较低, 且能通过缺陷态俘获少数载流子产生巨大的内部光电导增益, 从而实现高的响应度而备受关注^[22,23]. 因此, 通过调控 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的能带结构及其本征缺陷, 能够实现高响应度、低暗电流的理想探测器, 从而避免复杂的加工工艺^[24]. 尽管优势明显, 传统正入射 (front-illumination, FI) 金属-半导体-金属 (metal-semiconductor-metal, MSM) 结构的性能仍受限于电极对入射光的遮蔽这一关键物理瓶颈. 传统探测器通常采用 Ti/Au 等不透明金属电极, 这些电极直接覆盖在光敏层上, 会严重阻挡光子进入, 大幅降低量子效率. 为解决此问题, 采用氧化铟锡 (indium tin oxide, ITO) 等透明导电氧化物是提升器件性能的常用方案. 本研究选择 ITO 作为电极, 正是基于其优异的导电性以及 n 型 Ga_2O_3 形成高质量欧姆接触的能力, 这对于保证载流子的高效收集至关重要^[25]. 然而, ITO 虽然在可见光区高度透明, 但在深紫外波段的透射率会急剧下降, 变得近乎不透明. 因此, 在 FI 模式下, 即便是“透明”的 ITO 电极, 依然会对入射光产生严重的“遮蔽效应”, 大幅削减了光敏区的有效面积, 从根本上限制了光子捕获效率.

为突破此限制, 本文提出并构筑了一种全透明 Ga_2O_3 日盲探测器, 其核心在于采用了背入射 (back-illumination, BI) 的创新结构. 该设计巧妙地利用了双面抛光蓝宝石 (Al_2O_3) 衬底在深紫外波段 (>200 nm) 的优异透明性, 使光子能够完全绕开位于顶部的 ITO 电极, 直接从器件背部无障碍地入射到整个 Ga_2O_3 有源层. 这种“无遮蔽”的光路设计解决了传统 FI 结构中的光子损失问题, 使得光敏面积最大化, 从而将光子利用效率提升至

极限.

基于这一高性能器件平台, 本研究不仅系统地阐明了背照式结构在提升光电响应性能方面的物理机制和决定性优势, 更进一步探索了其在先进光信息获取与处理中的应用潜力. 具体而言, 我们发掘并验证了器件因 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 材料本征晶格各向异性而具备的偏振光探测能力, 并成功搭建了非视距日盲紫外通信演示系统, 展示了其在复杂信道下进行高保密信息传输的可行性. 本研究为开发高性能、多功能的全透明 Ga_2O_3 基光电器件提供了有效的设计思路和实验依据.

2 实验部分

2.1 器件制备

采用射频磁控溅射 (magnetron sputtering) 技术, 在 (0001) 双抛光 Al_2O_3 基底 (尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$) 上沉积 Ga_2O_3 薄膜. 在沉积过程中, 溅射功率设定为 70 W, 溅射气压控制在 1.0 Pa, 以确保薄膜的均匀性和结晶质量. 为了提高薄膜的质量, 氩气流量保持在 40 mL/min (标准状况), 并适当增大氧气流量至 8 mL/min (标准状况), 保持氩氧比为 5:1, 同时将沉积温度控制在 750 °C. 这一工艺条件有助于提高薄膜的结晶性和光电性能. 沉积完成后, 采用传统掩模技术, 在制备好的 Ga_2O_3 薄膜上利用磁控溅射法沉积 ITO 作为透明导电电极, 经过 300 °C 空气退火, 最终制备出带有 ITO 透明导电叉指电极. 该电极具体尺寸为: 长度 2800 μm 、宽度 200 μm 、间距 200 μm , 器件的有效面积为 0.0452 cm^2 , 该电学有效面积的定义与光入射方向无关, 因此在正入射和背入射两种工况下均采用相同的面积进行电流/功率归一化.

2.2 样品表征及测试

样品的晶体结构通过 X 射线衍射仪 (XRD) 表征, 表面形貌由原子力显微镜 (AFM) 分析. 用分光光度计 (UV-Vis) 表征所制备薄膜的紫外-可见吸收光谱电学特性使用 Keithley-4200 SCS 和 2450 型分析仪进行测量. 测试系统使用三轴屏蔽电缆连接至探测站以确保低噪声特性. 噪声谱密度采用 FS380 Pro 设备测量, 最低噪声极限为 $10^{-28}\text{ A}^2/\text{Hz}$. 进行背入射测试时, 将样品以点焊的形式连接于一个中央挖空的 PCB 板上, 中间孔洞可暴露出器件

的吸光区域, 利用夹具连接 PCB 板上的接触电极进行电学连接, 光束穿过透明的蓝宝石衬底, 从器件的背部注入到 Ga_2O_3 有源层. 借助偏振片, 可根据透射轴方向的不同获得不同方向的线性偏振光, 完成器件的偏振性能测试. 非视距演示测试采用信号发生器、示波器及 255 nm 可调制光源等设备, 通过模拟实际应用环境, 测试器件在非视距条件下的光电性能.

3 结果与讨论

为制备高性能全透明 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 日盲探测器, 需在透明双抛的衬底上沉积高质量的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜. 采用磁控溅射法制备 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜, 该方法工艺简单且易于调节生长环境 (图 1(a)). 制备的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜厚度约为 300 nm (通过椭圆偏振仪测定), 在厚度选择上, 主要考虑了薄膜吸收效率与器件性能的平衡. 继续增厚收益有限且不利载流子输运, 过薄则吸收不足; 结合先前的 MSM 结构研究工作 [26], 300 nm 在背入射器件中实现了吸收-输运的较优

平衡. 在双抛 Al_2O_3 衬底上沉积 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 外延薄膜的 XRD 分析结果如图 1(b) 所示, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 则在 18.88° , 38.26° , 58.90° 和处显示出 3 个清晰的衍射峰, 分别对应于其 $(\bar{2}01)$, $(\bar{4}02)$ 和 $(\bar{6}03)$ 晶面. 这些尖锐的衍射峰表明薄膜具有高度结晶性, 证明沉积的薄膜为单一取向的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜, 反映出晶体结构中缺陷极少, 从而有利于载流子的高效传输. AFM 分析进一步显示, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面相对平整, 表面粗糙度的均方根值 (RMS) 低于 1.5 nm, 如图 1(c) 所示. 对在双抛 Al_2O_3 沉积的 Ga_2O_3 薄膜进行了紫外-可见光吸收谱的光学表征, 如图 1(d) 所示, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜在 200—280 nm 日盲区域展示出很强的光吸收特性, 在 255 nm 处出现了陡峭的光学吸收边, 证明在 Al_2O_3 上外延的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜具有优异の日盲紫外探测性能, 为开发全透明日盲光电器件奠定了坚实基础. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的禁带宽度 E_g 可以利用 Tauc 理论计算得出, 其关系如下:

$$(\alpha h\nu)^{1/n} = K(h\nu - E_g),$$

其中 α 是吸收系数, $h\nu$ 是入射光子能量, K 为常

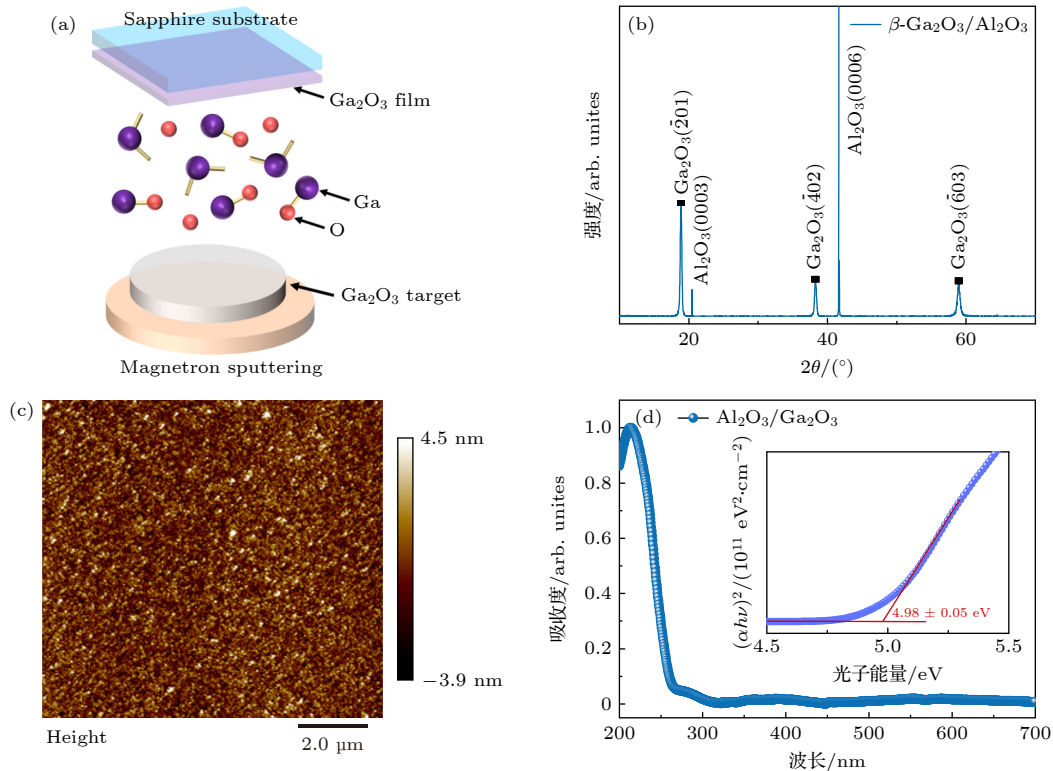


图 1 (a) 磁控溅射沉积系统示意图; (b) 在双面抛光 Al_2O_3 衬底上沉积的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的 XRD 谱图; (c) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面的 AFM 形貌图; (d) 薄膜的光学吸收光谱, 插图为 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 的关系图, 用于带隙估算

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the magnetron sputtering deposition system; (b) XRD pattern of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin film deposited on a double-side polished Al_2O_3 substrate; (c) AFM surface morphology of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ film; (d) optical absorption spectrum of the film, with the inset showing the $(\alpha h\nu)^2$ versus $h\nu$ plot for bandgap determination.

数, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 为直接带隙半导体, n 为 $1/2^{[27]}$. 拟合结果如图 1(d) 插图所示, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜禁带宽度 E_g 约为 (4.98 ± 0.05) eV (取值可能受晶向、薄膜质量与拟合区间影响).

图 2(a) 为器件结构示意图, 在双面抛光的 Al_2O_3 衬底上制备 Ga_2O_3 吸收层, 并在其正反两侧各布置一对互指电极. ITO 因其宽禁带 (≈ 3.4 eV) 而具备良好透明性, 但在紫外波段仍会吸收部分光子, 于是正入射模式下, 只有从互指间隙透过的光能够进入 Ga_2O_3 , 电极对光的遮挡会减少进入吸收层的光量. 相比之下, 背入射照明模式不存在这一问题, 借助衬底在 255 nm 处的高透过率, 将紫外光几乎无衰减地注入吸收层, 大幅提升光子利用效率. 图 2(b) 为样品正入射照明和背入射照明模式下在黑暗和光照下 ($100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 255 nm) 的电流-电压 (I - V) 特性曲线. 可以看出, 两种照明模式下的光电探测器均表现出优异的光响应. 单与正入射照明模式相比, 背入射照明模式下的光电流更高. 这种光电流的增强可归因于更高的光生载流子

产生率. 鉴于此, 我们后续使用背入射照明的工作方式对器件进行性能的全面表征. 响应度 R 是评估光电探测器灵敏度的重要指标, 其计算公式为

$$R = \frac{I_{\text{ph}} - I_{\text{d}}}{PS},$$

其中, I_{ph} 为光电流, I_{d} 为暗电流, P 为入射光功率, S 为探测器的有效面积. 图 2(c) 显示了器件在 200—700 nm 波长范围内的归一化光谱响应, 其中响应度在 250 nm 处达到了最高值. 紫外可见抑制比 (定义为 $R_{250 \text{ nm}}/R_{400 \text{ nm}}$) 的抑制比达到 1.2×10^4 . 这证明, 基于 Ga_2O_3 的全透明日盲探测器在深紫外光区域的高光电转换效率, 并表现出对日盲紫外光的优异选择性, 完全满足日盲检测的要求. 此外, 在 1—100 kHz 的频率范围内测量了暗态和光照下的噪声功率密度如图 2(d) 所示, 有无光照条件下的噪声电流具有显著的对比, Ga_2O_3 全透明日盲探测器在黑暗, 1 Hz 的条件有着低至 $0.7 \text{ pA}/\text{Hz}^{1/2}$ 噪声电流.

图 3(a) 展示了基于 Ga_2O_3 薄膜的全透明日盲探测器在暗态及 255 nm 光照下的 I - V 特性曲线.

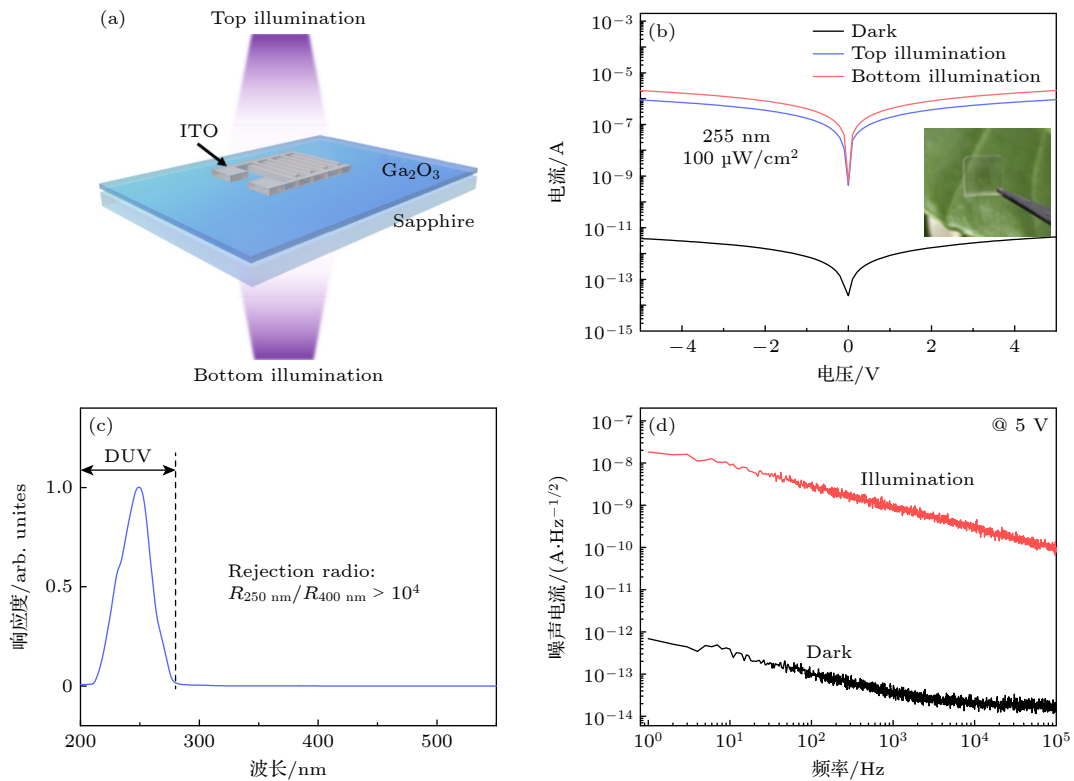


图 2 (a) 基于 Ga_2O_3 的全透明日盲紫外探测器结构示意图; (b) 在正入射与背入射光照模式下的 I - V 特性曲线; (c) 器件的归一化光谱响应; (d) 在暗态和 255 nm 紫外光照下的噪声电流比较

Fig. 2. (a) Schematic structure of the fully transparent Ga_2O_3 -based solar-blind UV photodetector; (b) I - V characteristics under front-illumination and back-illumination; (c) normalized spectral responsivity of the device; (d) noise current measured in the dark and under 255 nm UV illumination.

稳定的线性 I - V 曲线清晰显示了 ITO 电极与 Ga_2O_3 薄膜之间的欧姆接触, 这种结构有效抑制了势垒效应, 同时促进了载流子传输. 此外, 对这种光电探测器的电阻特性进行研究, 结果如图 3(b) 所示. 在黑暗条件下, 器件的电阻超过 1 T Ω , 导致暗电流非常微弱. 当施加 500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光照时, 器件的电阻迅速下降超过 6 个数量级至 0.8 M Ω , 这归因于该 Ga_2O_3 薄膜对深紫外光的高度敏感性. 为了更好地理解光电探测器的功率依赖行为, 分析了不同入射光功率下的 R 、外部量子效率 (EQE)、等效噪声功率 (NEP)、比探测率 (D^*) 等衡量探测器性能的关键参数, 其计算表达式为

$$\text{EQE} = \frac{Rh\nu}{e} \times 100\%,$$

$$\text{NEP} = \frac{I_{\text{noise}}}{R},$$

$$D^* = \frac{\sqrt{S \cdot \Delta f}}{\text{NEP}},$$

其中 I_{ph} 为光电流, I_{d} 为暗电流, S 为探测器有效

面积 (约 0.0452 cm^2), R 为电流响应度, h 为普朗克常数, ν 为光的频率, e 为单位电荷量, I_{noise} 为噪声电流密度, Δf 为频率带宽. 如图 3(c) 所示, 器件的响应度在 5 V 电压, 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的光强下最高可达 0.46 A/W, 对应于外量子效率约 222.4%. 随着光强的增大, R 和 EQE 略有下降, 这种趋势是由 Ga_2O_3 中的载流子动力学引起的. 在低功率下, 深能级陷阱产生复合受限的光电导增益——主要由本征点缺陷与表/界面态提供, 包括以 Ga 空位及其复合体为代表的深受主中心、自陷空穴 (STH, O⁻ 极化子), 以及表面吸附氧 (O_2^-/O^-)/界面态 [28–30]; 此外, 晶界与位错等结构缺陷亦可引入深能级. 深紫外激发后, 这些中心优先、长寿命地俘获空穴, 使电子有效寿命 τ_{lifetime} 远大于渡越时间 τ_{transit} , 从而形成 $\tau_{\text{lifetime}} > \tau_{\text{transit}}$, 增益 $G > 1$. 然而, 在更高的功率下, 这些陷阱态变得饱和, 降低了它们的调制效应, 并将载流子动力学转向重组主导的状态. 增强的非辐射复合过程, 包括肖克利-里德-霍尔复合和俄歇复合, 显著降低了载流子寿命和收集

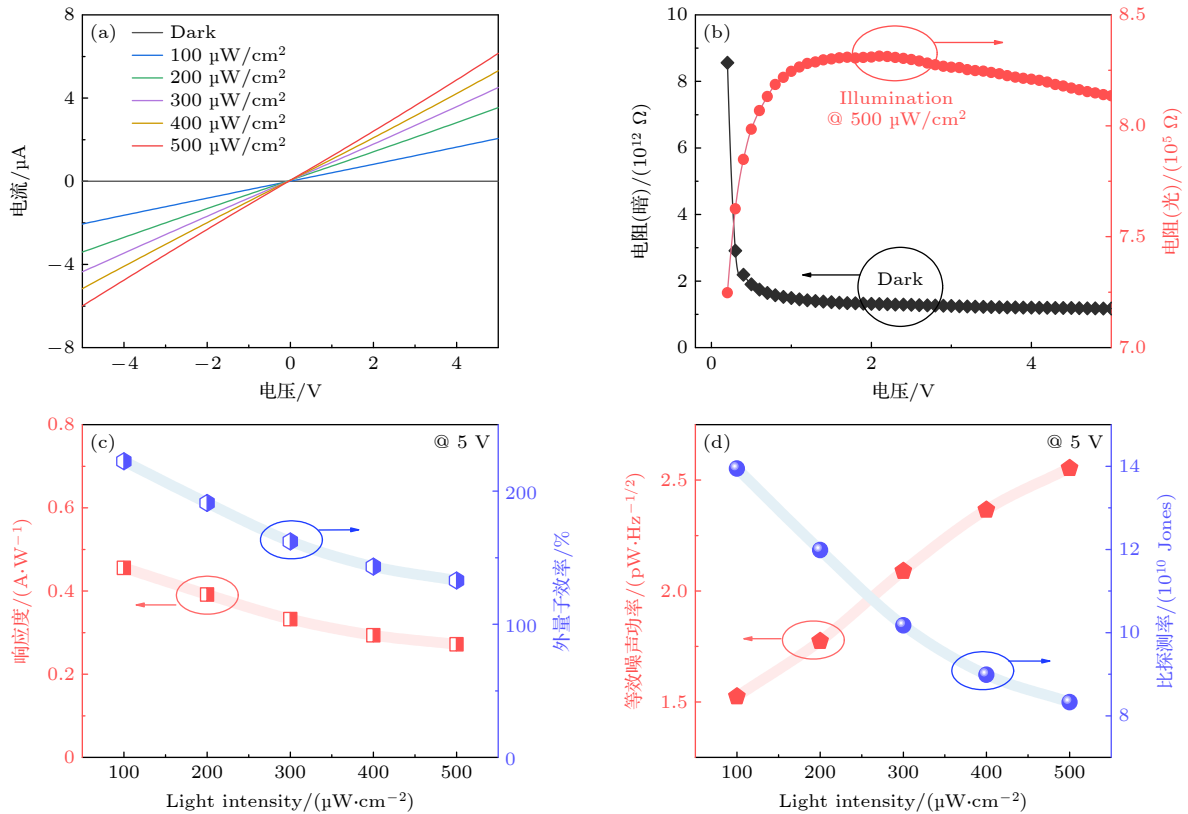


图 3 (a) 在黑暗和 254 nm 紫外光照条件下, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 全透明日盲探测器的 I - V 特性曲线; (b) 电阻特性; (c) 响应度、外量子效率与入射光功率强度的对应关系; (d) 等效噪声功率、比探测率与入射光功率强度的对应关系

Fig. 3. (a) I - V characteristics of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ transparent solar-blind photodetector in the dark and under 254 nm UV illumination; (b) resistance behavior of the device as a function of applied bias; (c) variation of R and EQE with incident optical power; (d) dependence of NEP and specific D^* on incident optical power.

效率. 此外, 为了衡量探测器的弱信号检测能力, 计算了器件的等效噪声功率随光强的变化如图 4(d) 红线所示. 在 5 V 的偏置电压下, NEP 最低值可达 $1.52 \text{ pW/Hz}^{1/2}$, 对应于最大比探测率为 $1.39 \times 10^{11} \text{ Jones}$, 显示出所制备的 Ga_2O_3 全透明日盲探测器在弱信号日盲探测应用方面的巨大潜力.

如图 4(a) 所示, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电导探测器在不同深紫外光强下的光电流-时间响应呈现出明显的强度依赖性: 随着入射光功率密度由 $100 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ 逐级增至 $500 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$, 稳态光电流逐渐约由 $1 \text{ }\mu\text{A}$ 提升至近 $8 \text{ }\mu\text{A}$. 将光电流与光强的关系绘制在对数坐标下, 可得到经验拟合关系:

$$I_{\text{ph}} \approx \alpha \times P^\beta,$$

其中 P 表示入射光的强度, 而 β 是与器件内部的缺陷有关的常数. 其中 $\beta < 1$ 表明器件内在缺陷对光生载流子的俘获导致光电流偏离理想线性增长. 这一非线性行为也与响应度随光强下降的趋势相吻合^[23]. 图 4(b) 展示了在 5 V 偏压与 266 nm 脉冲激光激发条件下的归一化瞬态响应. 根据 10%—90% 区间范围确定响应上升沿和下降沿, 所制备的 Ga_2O_3 基光电探测器的上升时间和下降时间分别为 $24 \text{ }\mu\text{s}$ 和 1.24 ms , 这与大多数快速响应的 Ga_2O_3 基光电探测器相当^[31,32].

该器件所展现出的优异深紫外光电响应性能, 归因于结构设计与材料物理特性协同优化. 双抛 Al_2O_3 衬底在 255 nm 附近波长范围内是透明的. 这使得背照明模式下的器件有更多的面积暴露在光下, 能够吸收更多的光子. 两种模式下的载流子传输过程如图 5 所示. 在正入射照明模式下, 由于

ITO 电极阻挡了大部分光子, 光子只能从叉指缝隙窗口进入 Ga_2O_3 材料 (图 5(a)). 在背入射照明模式下, 通过利用双抛 Al_2O_3 衬底在目标波长 255 nm 附近的高透明性, 深紫外光得以绕开顶部在紫外区存在显著吸收的 ITO 电极, 直接从器件背部入射到整个 Ga_2O_3 有源层, 如图 5(b) 所示. 由于没有电极对光的遮挡, 背照明器件比前照明器件具有更高的光通量和更好的光捕获能力, 进而产生更多的光生载流子. 随后, 在外部偏压作用下, 光生载流子被分离并漂移到外部电路, 形成更高的光电流. 为更直观阐明背入射模式的优势并定量分析 ITO 电极下方区域的贡献, 基于器件实际尺寸在 255 nm 紫外光场下进行了电场分布仿真. 图 5(c) 结果显示, 在正入射模式中, 电场几乎完全局限于 ITO 指间裸露区域, 而 ITO 覆盖区的 $|E|$ 较低 2—3 个数量级, 对光电流贡献可忽略, 清晰验证了深紫外波段的“电极遮蔽效应”. 相比之下, 背入射模式下电场在 Ga_2O_3 层内均匀分布, ITO 覆盖区与开窗区均有显著光场, 单位面积贡献接近, 总体上 ITO 覆盖区对光电流的贡献约占一半. 这一结果说明背入射有效绕开了顶部 ITO 的遮挡, 显著提升了整体光吸收体积和光生载流子数量, 这也是我们观察到背入射模式在响应度与均匀性上更优的根本原因.

图 6(a) 展示了 ITO/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 界面的能带偏移. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 带隙 $E_g(\text{Ga}_2\text{O}_3) \approx 4.98 \text{ eV}$ (见图 1(d)), 结合文献报道的材料参数, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的电子亲和势 $\chi_{\text{Ga}_2\text{O}_3} \approx (4.1 \pm 0.1) \text{ eV}$, ITO 的电子亲和势 $\chi_{\text{ITO}} \approx (4.4 \pm 0.1) \text{ eV}$, 禁带宽度 $E_g(\text{ITO}) \approx 3.5 \text{ eV}$ ^[25,33,34],

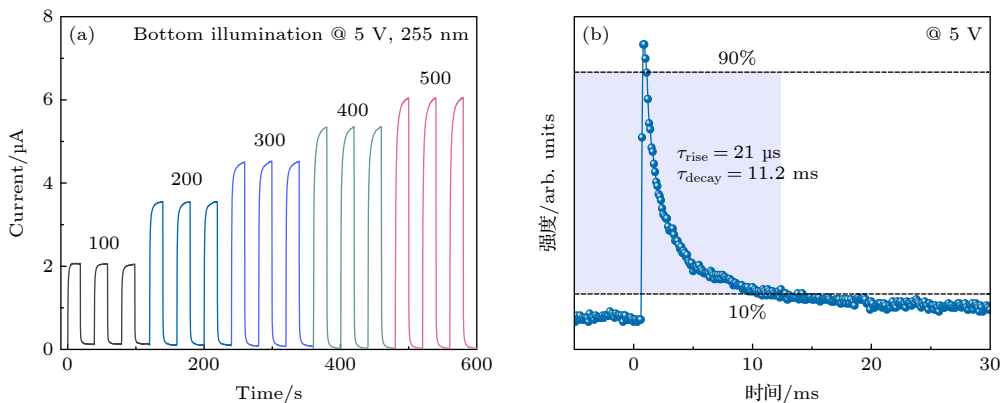


图 4 (a) 在 5 V 偏压和 255 nm 紫外光照射下, 探测器背入射光开关响应随光强变化的动态特性; (b) 在 5 V 电压下, 266 nm 脉冲激光激发时的瞬态光响应

Fig. 4. (a) Dynamic back-illumination switching response of the device under 5 V bias and 255 nm UV illumination at varying intensities; (b) transient photoresponse of the Ga_2O_3 transparent solar-blind photodetector under 266 nm pulsed laser excitation at 5 V bias.

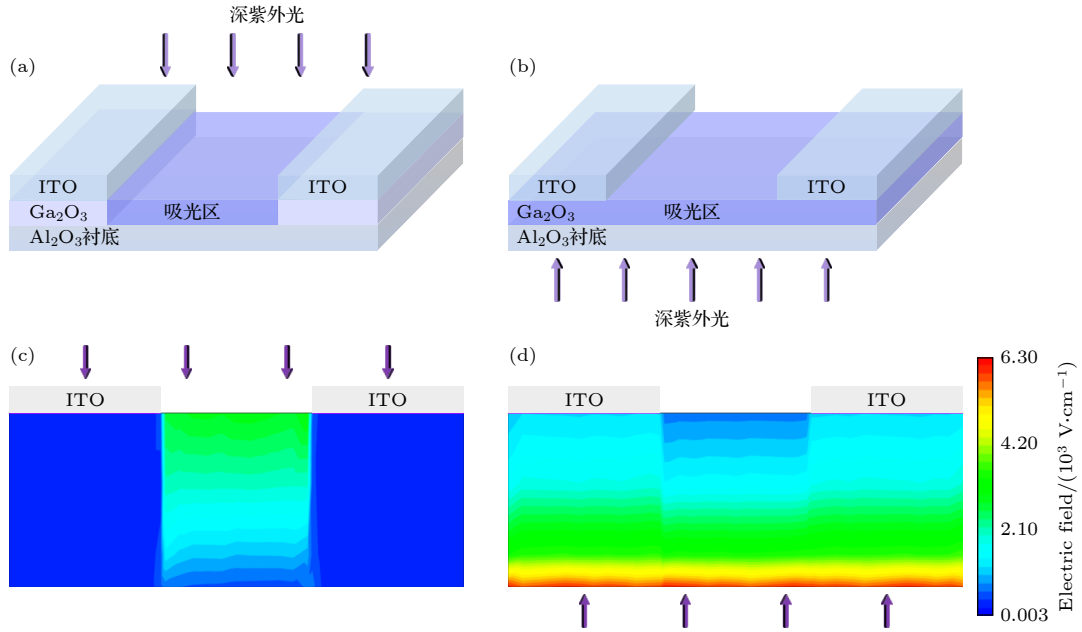


图 5 (a) 正入射模式下 Ga₂O₃ 全透明日盲探测器的示意图; (b) 背入射模式下的示意图; (c), (d) 器件截面的电场分布仿真图, 其中 (c) 为正入射模式, (d) 为背入射模式 (颜色由蓝到红代表电场强度由弱到强)

Fig. 5. (a) Schematic of the Ga₂O₃ transparent photodetector under front-illumination; (b) schematic under back-illumination mode; simulated electric field distribution in the device cross-section for (c) the front-illumination mode and (d) the back-illumination mode, the color scale from blue to red represents the electric field intensity from low to high.

由此确定 β -Ga₂O₃ 和 ITO 的导带偏移量 $\Delta E = (0.3 \pm 0.2) \text{ eV}$. 图 6(b) 显示了 ITO/Ga₂O₃/ITO 器件的能带结构及载流子传输过程, 其中 ITO 和 Ga₂O₃ 能带的相对导带底/价带顶 (CBM/VBM)

位置已通过先前的文献得到证实. ITO 与 n-Ga₂O₃ 形成的异质界面, 在经过适当的热处理工艺后, 通过在界面处形成高浓度的施主缺陷, 使得耗尽层宽度极窄. 这促使电子能够通过热电子-场发射机制高效隧穿势垒, 形成了具有低接触电阻的准欧姆接触, 保证了载流子的高效注入与收集. 在光照下, 光生空穴被 Ga₂O₃ 体内的深能级缺陷态有效俘获, 导致其复合寿命远长于电子的渡越时间. 为了维持电荷中性, 阴极会持续注入额外的电子以补偿被俘获的空穴, 直至其最终复合. 这一过程使得单个吸收的光子能够触发多个电子在外电路中循环, 产生了远大于 1 的光电导增益. 这种结构与界面工程的有机结合最终实现了更高的光电流增益 [10,25,35].

除了入射方式对器件性能的影响外, β -Ga₂O₃ 材料本身的晶体结构特性同样值得深入研究. 值得注意的是, β -Ga₂O₃ 由于其不对称单斜晶体结构, 还表现出显著的光电各向异性, 从而赋予器件本征的偏振敏感性 [36]. 这一特性不仅拓展了器件的功能维度, 也为其在紫外偏振探测和信息识别等新型应用中提供了可能性. 为了深入研究其偏振光响应特性, 我们对该器件进行系统的偏振测试, 构建偏振探测实验系统 (图 7(a)), 包含 255 nm 紫外光源、可调偏振片、半波片及信号采集模块, 通过控制偏振角 θ 定量分析器件各向异性响应. 其中紫外光

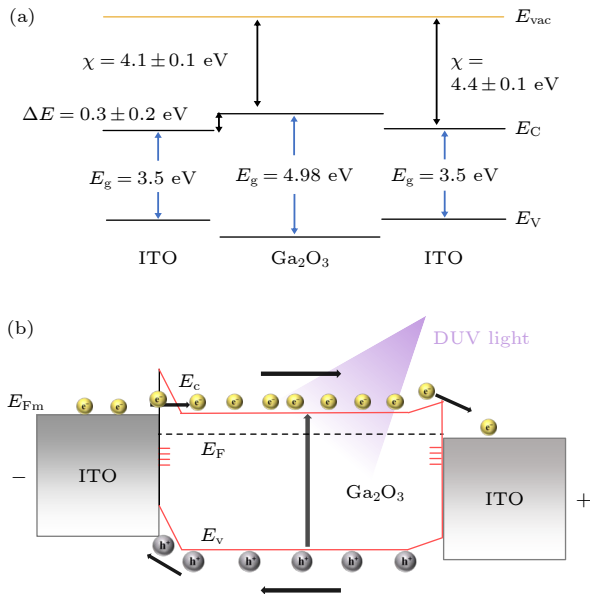


图 6 (a) ITO/Ga₂O₃ 的能带偏移示意图; (b) 深紫外照射下 ITO/Ga₂O₃/ITO 器件的能带结构及载流子传输示意图

Fig. 6. (a) Schematic illustration of ITO/Ga₂O₃ band alignment; (b) energy band diagram and carrier transport mechanism of the ITO/Ga₂O₃/ITO device under deep UV illumination.

源通过透镜聚焦后, 经起偏器转化为线偏振光. 随后, 线偏振光通过半波片调节其偏振方向, 并照射到 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电探测器上. 通过使用半导体参数仪实现数据采集, 从而获得不同偏振角下的光电流响应. 在实验中, 我们分别测量了不同偏振角度下, 线偏振光照射在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 器件上的光电流响应, 并将所得数据以极坐标图的形式展示, 如图 7(b) 所示. 在实验条件下, 紫外光的波长为 255 nm, 光功率密度为 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. 由于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的本征各向异性, 器件展现出显著的偏振敏感性. 采用以下数学模型拟合描述偏振光响应:

$$I_{\text{ph}} = I_{\text{max}} \cos^2(\theta + \varphi) + I_{\text{min}} \sin^2(\theta + \varphi),$$

式中, I_{max} 和 I_{min} 分别是最大和最小光电流, θ 为偏振角 [37]. 拟合结果表明, 器件具有明确的偏振敏感特性, 进一步验证了其在不同偏振角度下的光电响应规律. 其物理根源在于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的本征各向异性: 材料属单斜晶系 ($C2/m$), 对称性较低, 不同晶轴方向的原子堆垛与化学键合方式存在显著差异,

使介电张量与吸收系数具显著方向依赖并表现为线性二色性 [38]; 同时, 量子力学选择定则使价带-导带的偶极跃迁几率与入射光电场方向相关, 进一步导致吸收强度随 θ 变化 [39]. 在本工作采用的 (201) 取向薄膜中, 这种各向异性被固定在面内, 因此当线偏振旋转时, 电场与晶格主轴的夹角周期性改变, 最终在光电流中体现为稳定、可拟合的偏振角依赖性 [37].

此外, 为了研究光功率密度对器件偏振响应的影响, 我们在不同光功率密度条件下进行测试, 结果如图 7(c) 所示. 随着光功率密度的增大, 光电流在不同偏振角下的数值差异逐渐增大, 表明在较高光功率密度下, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 器件的偏振敏感性得到了显著增强. 这一现象进一步揭示了光功率密度在优化器件偏振响应性能中的关键作用 [40]. 偏振比作为衡量偏振敏感探测器性能的一个重要参数, 定义为最大光电流与最小光电流之比:

$$\text{PR} = I_{\text{max}}/I_{\text{min}}.$$

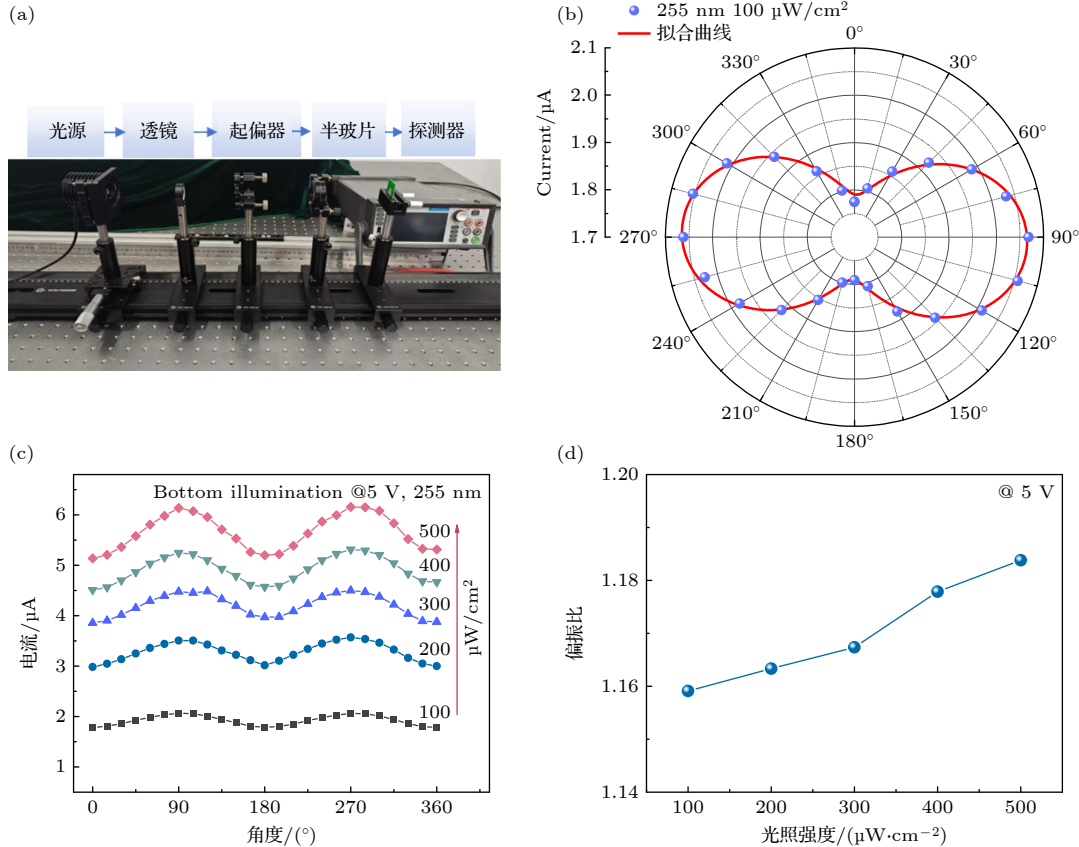


图 7 (a) 深紫外偏振测试系统实物图; (b) 255 nm, $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 紫外光照下的光电流与偏振角度的极坐标图; (c) 不同光强下, 从 0° 到 360° 偏振角的光响应曲线; (d) 偏振比随入射光强的变化关系

Fig. 7. (a) Photograph of the deep-UV polarization measurement setup; (b) polar plot of photocurrent versus polarization angle under 255 nm, $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ UV illumination; (c) angular-dependent photoresponse from 0° to 360° at various incident power levels; (d) polarization ratio as a function of incident light intensity.

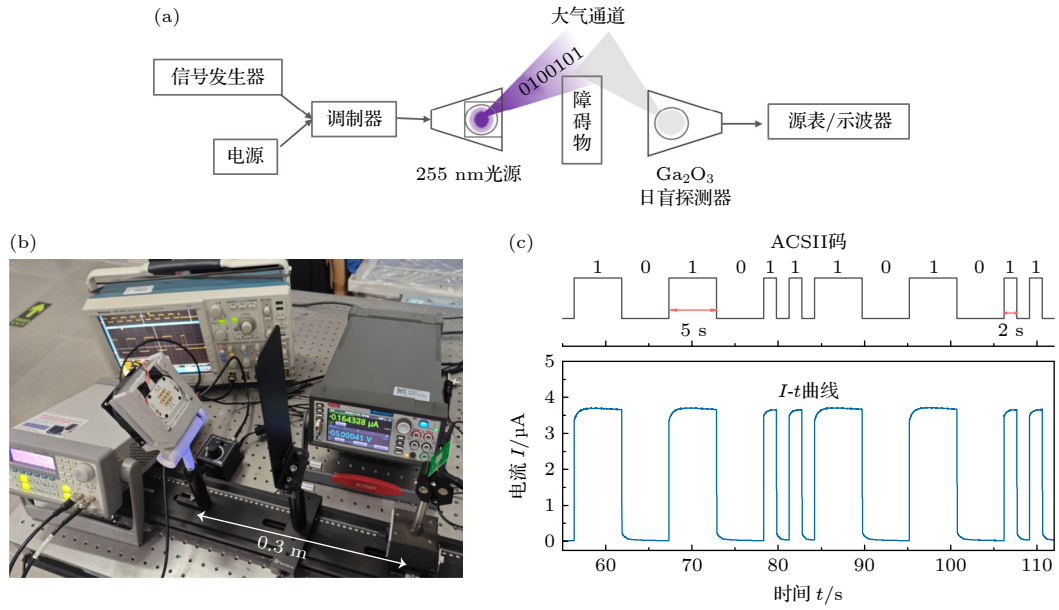


图 8 (a) 非视距日盲通信系统的工作原理示意图; (b) 实验装置实物图; (c) 不同发射信号下接收端 $I-t$ 响应曲线

Fig. 8. (a) Schematic of the non-line-of-sight solar-blind UV communication system; (b) photograph of the experimental setup; (c) $I-t$ response curves of the receiver for different transmitted signal patterns.

计算不同光功率密度下的偏振比结果如图 7(d) 所示. 实验表明, 随着光功率密度的增大, 偏振比呈现出轻微上升的趋势, 表明高功率密度能够进一步增强 β -Ga₂O₃ 材料的偏振响应灵敏度. 这一研究为 β -Ga₂O₃ 材料在偏振光探测和紫外光通信等领域的应用提供了有力的理论依据和实验支持, 揭示了其在偏振光探测技术中的潜在优势.

为检验器件优势在复杂散射场景中的实用价值, 我们选择具有典型工程意义的日盲紫外非视距 (NLOS) 通信进行系统级验证: 其一, 日盲带的低环境噪声使 β -Ga₂O₃ 探测器在无外置滤波片条件下即可获得高信噪比; 其二, NLOS 由大气散射产生的漫射、多角度入射正契合背入射结构对宽入射角与均匀照明的需求, 从而最大化体现器件在真实链路中的增益. 该系统在烟雾、尘埃及物理遮挡条件下仍实现稳定通信, 显著缓解传统直视光通信的通道约束^[10]. 图 8(a) 展示了该系统的工作原理示意图, 信号源通过调制器将信号编码为二进制序列 0 和 1, 并转化为日盲紫外光信号以特定角度发射. 紫外信号通过大气散射绕过障碍物, 最终由 Ga₂O₃ 基光电探测器接收. 与传统的光通信技术相比, Ga₂O₃ 基探测器不需要滤波片, 能够在自由空间内稳定且高灵敏度地检测日盲紫外信号, 具有显著的优势. 图 8(b) 展示了本工作搭建的非视距通信演示系统, 包含调制 LED 发射端、散射信道及 Ga₂O₃ 接收端, 通过 $I-t$ 曲线解析 ASCII 编码信号.

紫外 LED 光源与 β -Ga₂O₃ 探测器之间的直线距离为 0.3 m. 为了模拟非视距通信场景, 在光路中间放置障碍物, 整个通信实验在标准大气环境下进行. 在实验系统中, 信号通过激光二极管 (LED) 的开关状态进行调制, 将编码后的紫外光信号照射到 Ga₂O₃ 光电探测器. 通过半导体分析仪记录到的电流-时间 ($I-t$) 曲线 (图 8(c)) 清晰反映了接收到的信号强度. 实验结果表明, 在非视距环境中, 发射的紫外信号通过大气通道有效传输并被 Ga₂O₃ 探测器稳定接收. 电流曲线的明显变化与发送的 ASCII 编码 (如 0110) 高度一致, 表明系统在复杂的非视距环境中依然能够实现高效的信息传输. 需要说明的是, 本系统演示的信号速率处于秒级, 主要作为“概念验证”实验, 旨在验证探测器在复杂非视距散射信道中对微弱紫外信号的高保真接收能力. 器件本身的瞬态响应时间在微秒至毫秒量级 (见图 4(b)), 远快于演示速率, 这从物理上决定了其完全有潜力支持更高的数据传输速率. 该研究不仅验证了基于 Ga₂O₃ 探测器的非视距紫外通信系统的可行性, 而且为日盲紫外光通信技术在实际应用中的推广提供了理论依据与实验支持, 具有广泛的应用前景.

4 总结

本文系统地研究了一种基于背入射结构的全

透明 β -Ga₂O₃ 日盲紫外光电探测器, 并阐明了其高性能的物理机制与多功能应用潜力. 研究表明, 该器件的卓越性能源于外部量子效率与内部增益的协同优化: 结构上, 背入射设计利用透明 Al₂O₃ 衬底, 从根本上规避了“电极遮蔽”效应, 实现了近乎理想的高效率光子收集; 物理机制上, 通过界面工程形成的良好 ITO/Ga₂O₃ 欧姆接触, 与 Ga₂O₃ 体内的深能级缺陷态对光生空穴的有效俘获相结合, 极大地延长了载流子寿命, 从而产生了巨大的光电导增益. 此外, 进一步拓展了器件的应用维度. 我们利用 β -Ga₂O₃ 单斜晶系的本征各向异性, 成功实现了偏振光探测. 同时, 通过搭建 NLOS 通信演示系统, 验证了该探测器在复杂散射信道下进行高保真信息传输的可行性. 这项工作不仅为突破传统光电导探测器的性能瓶颈提供了一种有效的设计范式, 也展示了探测器在安全通信、偏振成像等先进领域中的广阔应用前景.

参考文献

- [1] Guo L, Guo Y N, Wang J X, Wei T B 2021 *J. Semicond.* **42** 081801
- [2] Kalra A, Muazzam U U, Muralidharan R, Raghavan S, Nath D N 2022 *J. Appl. Phys.* **131** 150901
- [3] Xu Z Y, Sadler M 2008 *IEEE Commun. Mag.* **46** 67
- [4] Tan Y F, Qiao Q, Zhao T G, Chang S L, Zhang Z F, Zang J H, Lin C N, Shang Y Y, Yang X, Zhou J W, Yu X, Yu X M, Shan C X 2024 *J. Mater. Sci. Technol.* **190** 200
- [5] Zhang Q Y, Li N, Zhang T, Dong D M, Yang Y T, Wang Y H, Dong Z G, Shen J Y, Zhou T H, Liang Y L, Tang W H, Wu Z P, Zhang Y, Hao J H 2023 *Nat. Commun.* **14** 418
- [6] Zhang H C, Liang F Z, Yang L, Gao Z X, Liang K, Liu S, Ye Y K, Yu H B, Chen W, Kang Y, Sun H D 2024 *Adv. Mater.* **36** 2405874
- [7] Qin Y, Long S B, Dong H, He Q M, Jian G Z, Zhang Y, Hou X H, Tan P J, Zhang Z F, Lv H B, Liu Q, Liu M 2019 *Chin. Phys. B* **28** 018501
- [8] Hu Z G, Cheng Q, Zhang T, Zhang Y X, Tian X S, Zhang Y C, Feng Q, Xing W, Ning J, Zhang C F, Zhang J C, Hao Y 2023 *J. Lumin.* **255** 119596
- [9] Yang H R, Cheng T H, Xin Q, Liu Y Y, Feng H Y, Luo F, Mu W X, Jia Z T, Tao X T 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 32561
- [10] Nie Y J, Jiao S J, Yang S, Zhao Y, Gao S Y, Wang D B, Yang X, Li Y F, Fu Z D, Li A M, Wang J Z, Zhao L C 2025 *Small* **21** 2501442
- [11] Kuang D, Xu S, Shi D W, Guo J, Yu Z N 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 038501 (in Chinese) [况丹, 徐爽, 史大为, 郭建, 喻志农 2023 物理学报 **72** 038501]
- [12] Zhang Q Y, Dong D M, Zhang T, Zhou T H, Yang Y T, Tang Y J, Shen J Y, Wang T J, Bian T Y, Zhang F, Luo W, Zhang Y, Wu Z P 2023 *ACS Nano* **17** 24033
- [13] Lu Y, Miranda C, Tang X, Liu Z Y, Khandelwal V, Krishna S, Li X H 2025 *Adv. Mater.* **37** 2406902
- [14] Dong D M, Peng M, Zhang T, et al. 2025 *ACS Photon.* **12** 3653
- [15] Wang Y F, Fu S H, Han Y R, Gao C, Fu R P, Wu Z, Cui W Z, Li B S, Shen A D, Liu Y C 2025 *Small* **21** e2406989
- [16] Chen W C, Xu X Y, Li M H, Kuang S L, Zhang K H, Cheng Q J 2023 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2202847
- [17] Dang X M, Jiao T, Chen P R, Yu H, Han Y, Li Z, Li Y H, Dong X 2024 *Chin. J. Lumin.* **45** 476
- [18] Yan S Q, Jiao T, Ding Z J, et al. 2023 *Adv. Electron. Mater.* **9** 2300297
- [19] Labed M, Park B I, Kim J, Park J H, Min J Y, Hwang H J, Kim J, Rim Y S 2024 *ACS Nano* **18** 6558
- [20] Cui M, Xu Y, Sun X Y, Wang Z P, Gong H H, Chen X H, Hu T C, Zhang Y J, Ren F F, Gu S L, Ye J D, Zhang R 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55** 394003
- [21] Shen G H, Liu Z, Zhang M L, Guo Y F, Tang W H 2023 *IEEE Electron Device Lett.* **44** 1140
- [22] Shen G H, Liu Z, Tan C K, Jiang M M, Li S, Guo Y F, Tang W H 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 041103
- [23] 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]
- [24] Wang L X, Liu Y T, Shi F Y, Qi X W, Shen H, Song Y L, Fang Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 214202 (in Chinese) [王露璇, 刘奕彤, 史方圆, 祁纤雯, 沈涵, 宋瑛林, 方宇 2023 物理学报 **72** 214202]
- [25] Zhang Y Q, Wang Y F, Fu R P, Ma J G, Xu H Y, Li B S, Liu Y C 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55** 324002
- [26] Wang X, Chen Z W, Guo D Y, Zhang X, Wu Z P, Li P G, Tang W H 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 2918
- [27] Zhang Y, Liu R 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]
- [28] Kananen B E, Giles N C, Halliburton L E, Foundos G K, Chang K B, Stevens K T 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 215703
- [29] McCluskey M D 2020 *J. Appl. Phys.* **127** 2002230
- [30] Neal A T, Mou S, Rafique S, et al. 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 062101
- [31] Liu H W, Zhou S R, Zhang H, Ye L J, Xiong Y Q, Yu P, Li W J, Yang X, Li H L, Kong C Y 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55** 305104
- [32] Xu Y H, Fan W H, Wang C 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 028104 (in Chinese) [许怡红, 范伟航, 王尘 2025 物理学报 **74** 028104]
- [33] Huan Y W, Sun S M, Gu C J, Liu W J, Ding S J, Yu H Y, Xia C T, Zhang D W 2018 *Nanoscale Res. Lett.* **13** 246
- [34] Musztyfaga S M, Gawlinska N K, Socha R, Panek P 2023 *Materials* **16** 1363
- [35] 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 [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, 郭宇锋, 唐为华 2022 物理学报 **71** 208501]
- [36] Zhang Y H, Liang H L, Xing F, Gao Q Q, Feng Y, Sun Y P, Mei Z X 2024 *Sci. China Phys., Mech. Astron.* **67** 247312
- [37] Zhang G, Wang Z Y, Chen S W, et al. 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** e00255
- [38] Wu C, Zhang G, Jia J H, Hu H Z, Wu F M, Wang S L, Guo D Y 2024 *J. Phys. Chem. Lett.* **15** 3828
- [39] Zhao K, Yang J H, Wang P, et al. 2024 *Adv. Mater.* **36** e2406559
- [40] Zhong W H, Huang H, Liu Y Q, et al. 2025 *Appl. Phys. Rev.* **12** 011420

Construction of a fully transparent β -Ga₂O₃ multi-mode solar-blind detection experimental system based on back incidence technology*

DONG Dianmeng¹⁾ WANG Jingchen¹⁾ XU Xiaoyun^{2)†} PENG Min¹⁾

WANG Zechuan¹⁾ WANG Cheng¹⁾ WU Zhenping¹⁾

1) (School of Physical Science and Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

2) (School of Jewelry, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

(Received 29 July 2025; revised manuscript received 20 September 2025)

Abstract

To meet the urgent demand for high-performance photodetectors in emerging solar-blind ultraviolet communication applications, this study systematically designs and implements a fully transparent β -Ga₂O₃ solar-blind photodetector based on a back-illumination architecture. The device is fabricated using RF magnetron sputtering to epitaxially grow high-quality β -Ga₂O₃ films (~ 300 nm in thickness, $\sim 4.98 \pm 0.05$ eV in bandgap) on double-polished sapphire substrates, with indium tin oxide (ITO) interdigitated electrodes forming efficient quasi-Ohmic contacts with n-type Ga₂O₃. The core advantage of this design lies in exploiting the high deep-UV transmittance of double-polished sapphire substrates, enabling incident photons to completely bypass the UV-absorbing ITO electrodes and eliminate photon loss caused by electrode shadowing effects in traditional front-illumination configurations. Consequently, the device demonstrates exceptional optoelectronic performance: a maximum responsivity of 0.46 A/W corresponding to an external quantum efficiency of 222.4%, an outstanding UV/visible rejection ratio of 1.2×10^4 , a minimum noise equivalent power of 1.52 pW/Hz^{1/2}, and a peak specific detectivity of 1.39×10^{11} Jones, with fast response times of 24 μ s (rise) and 1.24 ms (decay). Building on this high-performance detector platform, we further explore its multifunctional application potential by constructing a polarization detection system that utilizes the intrinsic lattice anisotropy of monoclinic β -Ga₂O₃, and successfully demonstrating a non-line-of-sight (NLOS) UV communication system that validates high-fidelity information transmission in complex scattering channels. This work provides effective physical insights and experimental basis for developing next-generation Ga₂O₃-based optoelectronic devices with integrated high sensitivity, polarization resolution, and NLOS communication capabilities, showing promising applications in secure communications and polarization imaging.

Keywords: Ga₂O₃, solar-blind photodetector, polarization detection, non-line-of-sight solar-blind UV communication

PACS: 52.70.Kz, 84.40.Ua, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.74.20251009

CSTR: 32037.14.aps.74.20251009

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12474065), the Fund of State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, China (Grant No. IPOC2025ZR05), and the Excellent Ph.D. Students Foundation of Beijing University of Posts and Telecommunications, China (Grant No. CX20253002).

† Corresponding author. E-mail: xuxiaoyun@bnu.edu.cn

基于背入射技术的全透明 β -Ga₂O₃ 多模式日盲探测实验系统构建

董典萌 王景晨 徐笑云 彭敏 王泽川 汪成 吴真平

Construction of a fully transparent β -Ga₂O₃ multi-mode solar-blind detection experimental system based on back incidence technology

DONG Dianmeng WANG Jingchen XU Xiaoyun PENG Min WANG Zechuan WANG Cheng WU Zhenping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 225203 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251009

CSTR: 32037.14.aps.74.20251009

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251009>

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

氧化镓悬臂式薄膜日盲探测器及其电弧检测应用

Gallium oxide cantilevered thin film-based solar-blind photodetector and its arc detection applications

物理学报. 2024, 73(9): 098501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240186>

基于HfO₂插层的Ga₂O₃基金属-绝缘体-半导体结构日盲紫外光电探测器

Ga₂O₃-based metal-insulator-semiconductor solar-blind ultraviolet photodetector with HfO₂ inserting layer

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

基于GaSe/Ga₂O₃异质结的自供电日盲紫外光电探测器

GaSe/ β -Ga₂O₃ heterojunction based self-powered solar-blind ultraviolet photoelectric detector

物理学报. 2024, 73(11): 118502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240267>

基于云母衬底生长的非晶Ga₂O₃柔性透明日盲紫外光探测器研究

Flexible transparent solar blind ultraviolet photodetector based on amorphous Ga₂O₃ grown on mica substrate

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

N掺杂对 β -Ga₂O₃薄膜日盲紫外探测器性能的影响

Effect of N-doping on performance of β -Ga₂O₃ thin film solar-blind ultraviolet detector

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

退火温度对磁控溅射掺锡氧化镓薄膜特性及其日盲光电探测器性能的影响

Influence of annealing temperature on the performance of radio frequency magnetron sputtered Sn-doped Ga₂O₃ films and its solar-blind photodetector

物理学报. 2025, 74(2): 028104 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20240972>