

氧化镓悬臂式薄膜日盲探测器及其电弧检测应用*

张裕¹⁾ 刘瑞文²⁾³⁾ 张京阳¹⁾ 焦斌斌²⁾³⁾ 王如志^{1)†}

1) (北京工业大学材料科学与工程学院, 新能源材料与技术研究所, 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124)

2) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2024年1月28日收到; 2024年2月18日收到修改稿)

金属-半导体-金属 (MSM) 型氧化镓薄膜探测器的性能高度依赖于氧化镓薄膜的均匀性, 工艺难度较高, 对规模化、量产化薄膜探测器提出了挑战. 本文首次在量产化悬臂式薄膜芯片表面物理沉积氧化镓薄膜, 实现了一个五对叉指电极结构的 MSM 型氧化镓薄膜日盲探测器. 得益于微机电系统 (MEMS) 工艺制备的悬臂式电极结构保护了内部电路与探测薄膜的完整均匀性, 所获得的氧化镓薄膜虽然是非晶结构, 但探测器仍然具备良好的紫外探测性能. 在 18 V 偏压下其探测率达到 7.9×10^{10} Jones, 外量子效率达到 1779%, 上升和下降时间分别为 1.22 s 和 0.24 s, 接近晶体氧化镓薄膜的探测性能. 该探测器在无任何光学聚焦系统的情况下, 实现了对户外日光环境下脉冲电弧的灵敏检测, 将在日盲探测领域具有良好的潜在应用价值. 本工作基于 MEMS 工艺的悬臂式电极结构开发的敏感功能薄膜沉积技术, 避免了功能薄膜大面积均匀性对刻蚀电路的影响, 为 MSM 型薄膜探测器的制备提供了新的技术方法和工艺路线.

关键词: 氧化镓, 日盲探测器, 电弧检测**PACS:** 85.60.Gz, 85.30.-z, 81.15.Cd**DOI:** 10.7498/aps.73.20240186

1 引言

在紫外光谱区域 (10—400 nm) 中, 波长范围在 200—280 nm 的紫外线称为日盲紫外线. 对于该波段响应的日盲光电探测器, 即使暴露在正常的室外照明下, 也不会产生可测量的信号, 在军事和民用探测领域具有巨大的潜力^[1-3]. 基于日盲光电探测器特殊性能的要求, 超宽禁带 (禁带宽度大于 4 eV) 半导体是制备日盲探测器的首选材料^[4]. 氧化镓 (Ga_2O_3) 具备 4.4—5.3 eV^[5-8] 的禁带宽度、材料易加工以及紫外吸收系数大等综合优点, 因此被视为理想日盲紫外探测材料的候选者.

从目前氧化镓日盲探测器发展现状来看, 已有大量不同结构的氧化镓探测器报道. 例如, Li 等^[9]

采用简单浸没法构建了 n- Ga_2O_3 /p-CuSCN 核-壳微线异质结型日盲探测器, 该器件在 5 V 偏压下具备 1.03 pA 的超低暗电流、 4.14×10^4 的高光暗电流比 (the photo-to-dark current ratio, PDCR)、 1.15×10^4 的高抑制比 (R_{254}/R_{365}), 除此之外还兼备自供电和低功耗等优点. 更进一步, Li 等^[10] 在剥离的 β - Ga_2O_3 /CuI 核-壳微线异质结构上, 构建了一个宽带紫外光 (200—410 nm) 自供电光电探测器. 该器件即使没有封装也能在 10 个月内保持优越的稳定性. Fu 等^[11] 以 ITO 和 Ni 为叉指电极, 在 β - Ga_2O_3 薄膜上制备了 ITO/ β - Ga_2O_3 /Ni 肖特基结日盲光电探测器. 在 20 V 和 254 nm 光照 ($40.94 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) 下, ITO/ β - Ga_2O_3 /Ni 探测器的响应度 (responsivity, R)、探测率 (detectivity, D^*) 和外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 分别为 470.62 A/W,

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFB3500403) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wrz@bjut.edu.cn

1.11×10^{15} Jones 和 $1.67 \times 10^5\%$. Li 等^[12] 基于非晶氧化镓薄膜, 成功构建了一种含氧化镓透明电极的光电导型日盲深紫外探测器. 该器件的 R 为 1.3×10^4 A/W, D^* 为 3.2×10^{14} Jones, EQE 为 $6.7 \times 10^6\%$, 并且能够有效地检测到 204 pW/cm² 以下的极弱日盲深紫外信号. 在诸多的探测器结构中, 金属-半导体-金属 (MSM) 型探测器拥有简单叉指结构, 单位面积内结电容较小, 易于集成且与晶体管工艺兼容等优势^[13], 已成为目前的研究热点. Gao 等^[14] 用 AlN 缓冲层, 利用金属有机物化学气相沉积法 (MOCVD) 制备了高结晶质量的 β -Ga₂O₃ 薄膜, 并采用磁控溅射法在氧化镓薄膜上沉积 Ti/Au (100 nm / 300 nm) 双层叉指电极制备了 MSM 探测器. 得益于 AlN 缓冲层的加入, 降低了 Ga₂O₃ 薄膜生长过程的晶格失配率. 探测器在 3 V 偏压下, 暗电流最小达到 45 fA, PDCR 达到 8.5×10^5 , 峰值响应度为 38.8 A/W. Liu 等^[15] 使用 MOCVD 制备 Ga₂O₃ 薄膜, 再利用紫外光刻、剥离和离子束溅射等微纳加工方法成功制备 4×4 规模的 MSM 结构深紫外探测器阵列. 探测器阵列的 R 为 2.65×10^3 A/W, D^* 为 2.76×10^{16} Jones, EQE 为 $1.29 \times 10^6\%$, 光电导增益远大于 1, 然而这类器件对材料的大面积均匀性和加工工艺的稳定性要求更高.

综上所述, 目前具备优异性能的 MSM 型 Ga₂O₃ 薄膜探测器对薄膜的晶体质量、均匀性提出了苛刻的要求, 无疑是对薄膜探测器实现规模化、量产化的挑战. 本文首次在量产化悬臂式薄膜芯片表面物理沉积 Ga₂O₃ 薄膜, 实现了一个具备典型 MSM 结构的 Ga₂O₃ 薄膜日盲探测器. 其中悬臂式薄膜芯片采用成熟的 MEMS 工艺制备, 该工艺包含了电路刻蚀工艺和电极沉积工艺, 相比于目前在 Ga₂O₃ 薄膜上刻蚀电极电路的工艺, 能够轻易实现探测器量产化, 避免了 Ga₂O₃ 薄膜大面积均匀性的难题. MEMS 工艺制备的探测器具备独立的小尺寸电极电路, 能够灵活实现任意规模尺寸的阵列结构. 采用成本低廉、可控性高和成膜尺寸大的射频磁控溅射技术沉积的非晶态 Ga₂O₃ 薄膜整体均匀, 所获的 Ga₂O₃ 薄膜探测器拥有可观的日盲探测性能. 在无任何光学聚焦系统配置的条件下, 该探测器在户外日光环境下展示出对脉冲电弧的灵敏检测, 证实了该探测器在未来日盲探测领域具备潜在应用价值.

2 实验方法

利用光刻刻蚀、湿法腐蚀等工艺实现芯片悬臂式结构, 沉积金属 Pt 作为叉指电极. 使用银胶将悬臂式薄膜芯片固定在转接板上, 随后用金线实现芯片电极与转接板触点之间的搭接. 采用磁控溅射技术在悬臂式薄膜芯片上沉积 Ga₂O₃ 光敏薄膜, 基靶采用氧化镓陶瓷靶材, 溅射时间为 1 h. 低温等离子体处理采用等离子体化学气相沉积仪器, 在 200 °C 下氩气氛围中处理 1 h 能够改善物理沉积薄膜的表面结构, 实现非晶薄膜内无序晶粒重组, 削减薄膜内部缺陷. Ga₂O₃ 薄膜的晶体结构、表面形貌、元素成分、元素分布、表面粗糙度和光学带隙分别通过 X 射线衍射仪 (XRD, Bruker D8 Advance)、扫描电子显微镜 (SEM, FE-STEM SU9000)、X 射线光电子能谱仪 (XPS, Thermo Scientific K-Alpha)、能谱仪 (EDS, FE-STEM SU9000)、原子力显微镜 (AFM, Bruker Dimension Icon) 和紫外-可见光漫反射测试 (Hitachi U4150) 测量获得. 探测器的光电性能, 包括电流-电压特性 (I - V) 曲线和动态响应 (I - t) 曲线, 通过半导体测试设备 Keithley 2636B 来完成.

3 氧化镓悬臂式薄膜探测器

采用 X 射线衍射仪对溅射的 Ga₂O₃ 薄膜进行结晶度验证. 图 1(a) 显示了在实验条件下沉积的 Ga₂O₃ 薄膜的 XRD 曲线. 除了来自 SiO₂ 基底的约 28.8° 衍射峰外, 没有观察到特征峰, 表明生长的 Ga₂O₃ 薄膜是非晶态. 图 1(b) 展示的是 Ga₂O₃ 薄膜的 SEM 图像, 可以清晰看出晶体颗粒在其表面均匀分布. 图 1(c) 为图 1(b) 区域内的 EDS 能谱图像, 其中绿色和红色分别为氧元素和镓元素, 表明两元素在该区域内分布均匀. 图 1(d) 展示了 Ga₂O₃ 薄膜的 XPS 能谱, 说明薄膜中除了芯片中含有的 Si 元素外, 只含有 Ga 和 O 两种元素. Ga₂O₃ 的存在也可以通过 Ga³⁺ 的 Ga 2p_{3/2} 和 Ga 2p_{1/2} 的自旋轨道水平来证实, 如图 1(e) 所示分别位于 1118.08 eV 和 1145.08 eV^[16]. 图 1(f) 为 Ga₂O₃ 薄膜 5 μm × 5 μm 扫描面积的 AFM 图像. 薄膜的平均粗糙度 (RMS) 为 3.44 nm, 表明薄膜的表面较平整光滑. 为了确定沉积的 Ga₂O₃ 薄膜的日盲属性, 对其进行光学

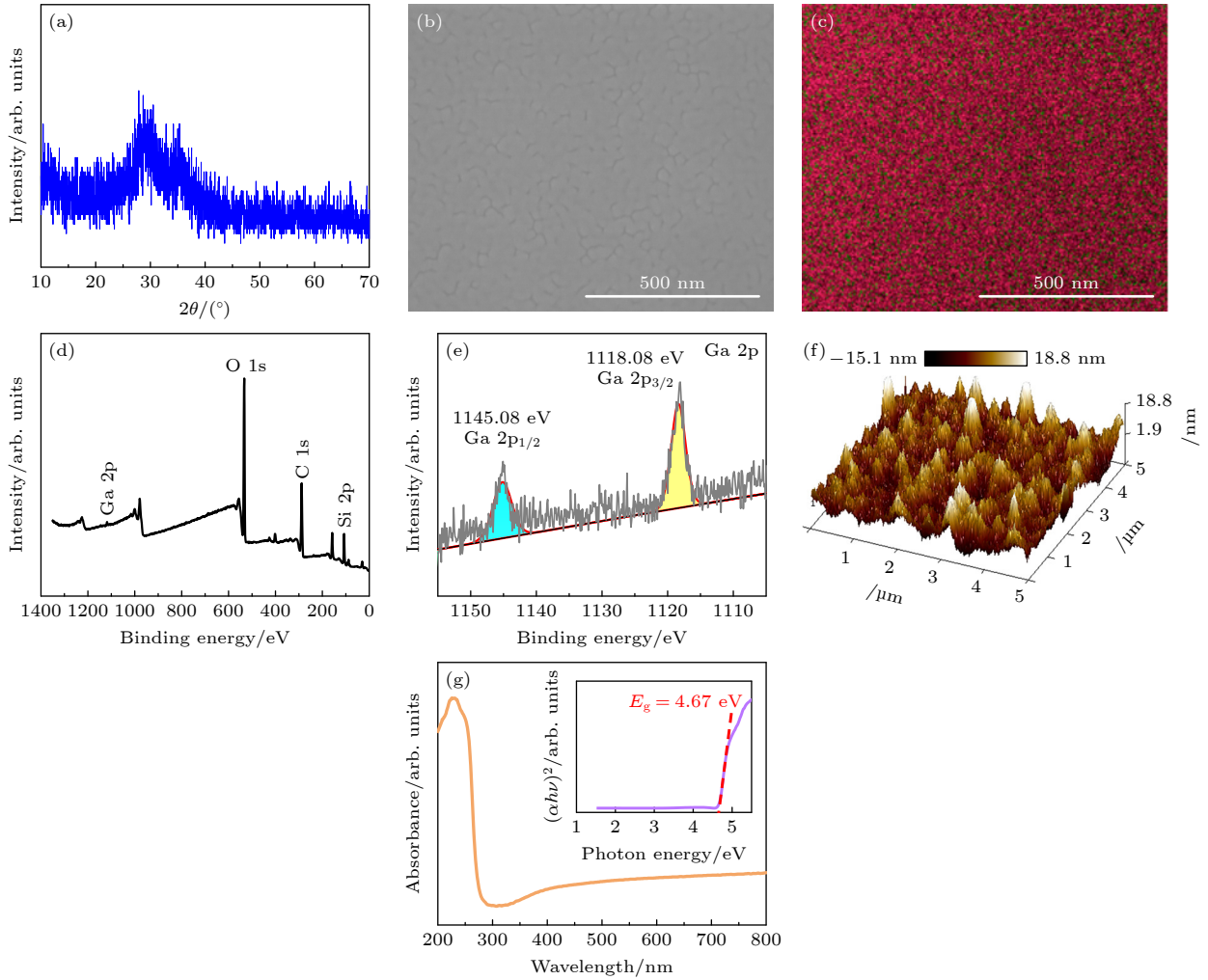


图 1 Ga_2O_3 薄膜的 (a) XRD 图谱、(b) SEM 图像、(c) EDS 图谱、(d) XPS 能谱、(e) Ga 2p 能谱、(f) AFM 图谱和 (g) 光吸收曲线; 图 (g) 插图显示了 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 的光学带隙图。

Fig. 1. (a) XRD pattern, (b) SEM image, (c) EDS pattern, (d) XPS energy spectrum, (e) Ga 2p spectrum, (f) AFM pattern, (g) optical absorption curve of Ga_2O_3 thin film. The inset in panel (g) shows the curve of $(\alpha h\nu)^2$ versus $h\nu$ for the determination of the optical band gap of Ga_2O_3 thin film.

吸收测试. 如图 1(g) 所示, Ga_2O_3 薄膜的吸收边约为 270 nm. 此外, 在超过 350 nm 处观察到微弱的吸收, 这可能是由于样品中存在缺陷. 对于直接带隙半导体, 遵循以下公式^[17]:

$$(\alpha h\nu)^2 = B(h\nu - E_g), \quad (1)$$

其中 α 是吸收系数, h 是普朗克常数, ν 是入射光的频率, B 是一个常数, E_g 是光学带隙. 通过绘制 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 的光学带隙图, 并将该图的直线部分外推到光子能量轴上就能获得样品的光学带隙. 薄膜的光学带隙被确定为 $E_g \approx 4.67$ eV, 如图 1(g) 的插图所示, 与之前的工作相近^[18,19].

图 2(a) 是 Ga_2O_3 薄膜探测器的实物照片, 探测器与贴片转直插转接板紧密结合, 这不仅有利于外接电路的连接搭建, 而且与众多电子电路有着良

好的兼容性. 图 2(b) 为悬臂式薄膜芯片的结构示意图, 采用悬臂式结构能够有效降低芯片功耗并提升其可靠性, 芯片的整体平面尺寸为 $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$. 图 2(c) 是图 2(b) 红色框中的叉指电极 SEM 图像, 芯片表面具有对称的叉指电极. 图 2(d) 展示了悬臂式薄膜芯片内部叉指电极的详细结构, 类似于三明治结构. 底层为具备叉指结构沟槽的芯片衬底, 中层为沉积的金属 Pt, 顶层为物理沉积的 Ga_2O_3 薄膜. 悬臂式电极结构中的电路刻蚀工艺和电极沉积工艺均在底层的芯片衬底上实现, 因此保证了顶层功能薄膜的完整性. 同时顶层沉积的 Ga_2O_3 薄膜覆盖在中层的 Pt 电极之上, 防止电极电路裸露而损伤, 对电极电路起到了保护作用. 顶层 Ga_2O_3 薄膜覆盖的区域为 $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$,

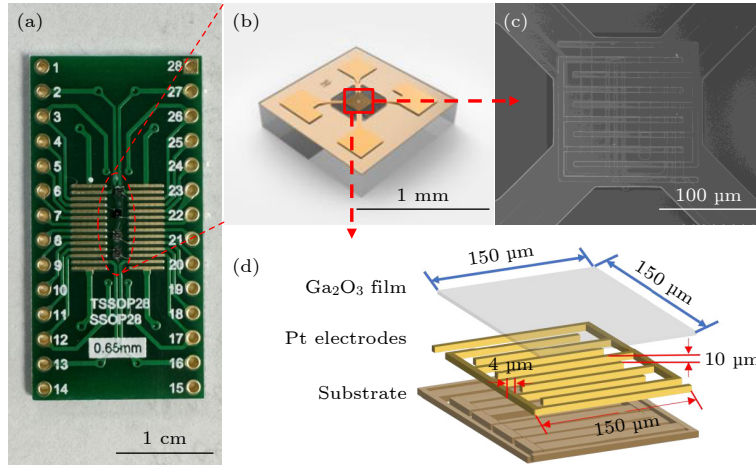


图 2 (a) Ga_2O_3 薄膜探测器的实物照片; (b) 悬臂式薄膜芯片的结构示意图; (c) 图 (b) 红色框中的叉指电极 SEM 图像; (d) 图 (b) 红色框中叉指电极的详细结构示意图

Fig. 2. (a) Physical photograph of Ga_2O_3 thin film-based photodetector; (b) schematic of the structure of the cantilevered thin film chip; (c) the SEM image of interdigital electrodes in the red box in panel (b); (d) the detailed schematic structure of interdigital electrodes in the red box in panel (b).

电极共有 5 对高精度叉指, 指长 $150\ \mu\text{m}$, 宽 $4\ \mu\text{m}$, 指间距为 $10\ \mu\text{m}$, 该探测器的有效辐照面积为 $2.25 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2$. 相比于公共电极结构器件^[15,20-23], 由该工艺制得的探测器具备独立的小尺寸电极电路, 能够灵活实现任意规模尺寸的阵列结构.

4 探测器性能测试分析

更进一步, 本工作研究了 Ga_2O_3 薄膜探测器的光响应特性, 如图 3 所示. 图 3(a) 首先测量了探测器在黑暗中和 $254\ \text{nm}$ 光照下的 $I-V$ 曲线, $254\ \text{nm}$ 光照条件下的整个 $I-V$ 曲线呈现出非线性行为, 表明薄膜与电极之间存在着肖特基势垒, 这可能是由于 Ga_2O_3 薄膜上存在许多表面态引起的^[24,25]. 图 3(b) 分别比较了 $2.08\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 光照强度 $254\ \text{nm}$ 和 $365\ \text{nm}$ 的时间与光电流之间的响应曲线, 发现探测器在 $254\ \text{nm}$ 光照下可以很容易地在高电流状态和低电流状态之间转换, 在 $18\ \text{V}$ 偏压下表现出 $0.17\ \mu\text{A}$ 的最大光电流和 $1.3\ \text{nA}$ 的暗电流. 这一结果表明该探测器对日盲紫外线具有高度的选择性. 本工作对 Ga_2O_3 薄膜探测器的一些关键参数进行了表征, 包括 PDCR, R , D^* 和 EQE, 分别被定义为^[26-29]

$$\text{PDCR} = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{I_{\text{dark}}}, \quad (2)$$

$$R = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{PS}, \quad (3)$$

$$D^* = \frac{RS^{1/2}}{(2qI_{\text{dark}})^{1/2}}, \quad (4)$$

$$\text{EQE} = \frac{hcR}{q\lambda}, \quad (5)$$

其中, I_{light} 和 I_{dark} 分别为光电流和暗电流, P 为光照强度, S 为探测器的有效辐照面积, c 表示光速, q 为电子电荷, λ 表示入射光的波长. 根据图 3(b) 中的实验结果, 在工作电压为 $18\ \text{V}$ 的情况下, 入射光强度为 $2.08\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 时, PDCR 为 130, R 达到 $0.364\ \text{A}/\text{W}$. 这一结果表明 Ga_2O_3 薄膜探测器对日盲紫外线具有可观的探测灵敏度. D^* 为 7.9×10^{10} Jones, 表明该器件具备感知较低可检测信号的能力. EQE 为 1779%, 表明该探测器对日盲紫外线的光电转换效率高, 能够有效地激发出电子-空穴对.

图 3(c) 展示的是在 $18\ \text{V}$ 偏压下不同光照强度的动态响应曲线. 可以清楚地看到, 随着光照强度的增大, 在较高的光强光照下, 器件拥有较大的 I_{light} . 这种关系是合理的, 因为在更高强度的光照下会产生更多的光生电子-空穴对, 从而产生更大的光电流. 为了更好地理解上述变化趋势, 在 $18\ \text{V}$ 偏压下光电流与光照强度之间的关系按照幂函数规律 ($I_{\text{ph}} \propto P^\theta$) 进行拟合, I_{ph} 和 P 分别代表净光电流 ($I_{\text{ph}} = I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}$) 和光照强度, 指数 θ 是一个反映光生载流子重组活动的经验值^[30]. 通过仔细拟合曲线, 在 $677-2080\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的光强下, θ 值为 0.75 (图 3(d)), 与理想值 ($\theta = 1$) 的轻微偏差表明器件中存在光电流复合损耗. 这可能是由

于在费米能级和导带边缘之间存在一些陷阱态^[31].

响应速度通常用光电探测器的响应时间来描述. 其特征是上升时间 τ_r 和衰减时间 τ_d , 分别定义为光电流从最大值的 10% 上升到 90% 的时间和从最大值的 90% 下降到 10% 的时间. 图 3(e) 中的数据表明, 在 254 nm 光照下, 上升时间为 1.22 s, 衰减时间为 0.24 s. 图 3(f) 显示了探测器在 18 V 偏压下工作的 $I-t$ 曲线, 总共统计了 1200 s 内光电流. 光电探测器可以很容易地在 10 s 的间隔内在“开”和“关”状态之间切换, 在研究的时间跨度 (大约 60 个周期) 中没有观察到明显的退化, 证实了 Ga_2O_3 薄膜探测器具有良好的稳定性能. 表 1 显示

了本工作与已报道的 MSM 型 Ga_2O_3 薄膜光电探测器的制备方法和探测性能的比较, 相较而言, 本文报道的 Ga_2O_3 探测器的探测性能并非十分出色. 为了改善并提高探测器的性能, 本文提出了一些适用于 MEMS 工艺的可行性方法. 例如, 利用金属铝纳米颗粒^[32] 或金属铂纳米颗粒^[33] 对 Ga_2O_3 薄膜表面进行修饰, 提升探测器的响应度和探测率; 电路结构采用非对称叉指电极^[34], 改变电极两端的肖特基势垒高度, 实现自供电探测以降低功耗; 适当调整 Ga_2O_3 薄膜退火温度^[35,36], 通过控制薄膜内部的氧空位浓度^[37], 实现探测器更高的 PDCR 和更快的响应速度.

表 1 MSM 型 Ga_2O_3 薄膜光电探测器的光响应参数比较

Table 1. Comparison of photoresponse parameters of MSM type photodetectors based on Ga_2O_3 thin film.

制备方法	偏压/V	暗电流/nA	PDCR	$R/(\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$	D^*/Jones	EQE/%	τ_r/s	τ_d/s	Ref.
MOCVD、磁控溅射	10	0.17	3.5×10^3	9.4	1.17×10^{12}	4.6×10^3	27	3.93	[28]
离子切割、光刻工艺	10	0.0287	953	0.13	—	—	2.96/34.17	1.94/32.64	[38]
脉冲激光沉积、磁控溅射	-15	12.4	—	29.08	2.16×10^{11}	1.4×10^4	0.41/0.52	1.06/1.68	[33]
卤化物气相外延、真空沉积和光刻工艺	10	10^{-2}	—	7×10^4	1.12×10^{18}	3.79×10^5	—	—	[39]
MOCVD、磁控溅射	5	$<10^{-3}$	1.1×10^6	0.046	3.4×10^{13}	22.4	0.96	0.19	[40]
MOCVD、光刻和离子束溅射	10	1.9×10^{-3}	8.97×10^7	634.15	5.93×10^{11}	3.1×10^5	—	—	[41]
MEMS工艺、磁控溅射	18	1.3	130	0.364	7.9×10^{10}	1779	1.22	0.24	This work

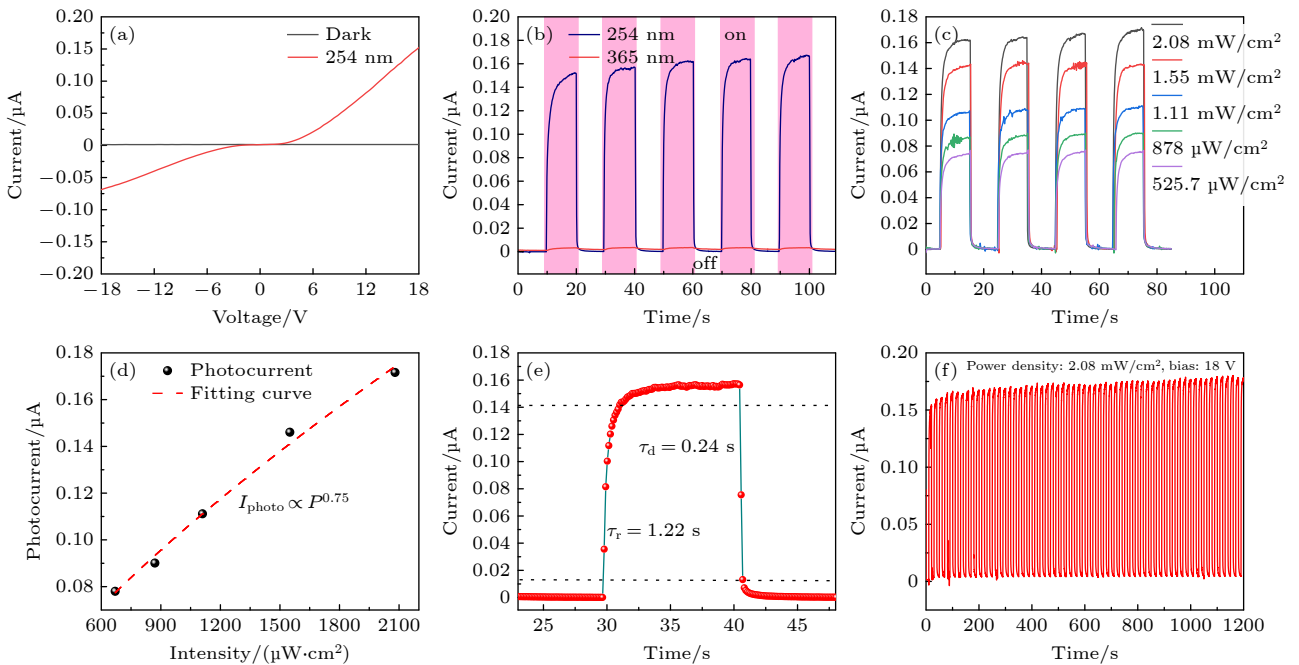


图 3 Ga_2O_3 薄膜探测器 (a) 在黑暗和 254 nm 光照下的 $I-V$ 曲线; (b) 254 nm 和 365 nm 光照下的动态响应曲线; (c) 在 18 V 偏压下不同光照强度的动态响应曲线; (d) 光电流与光强的关系; (e) 上升/下降曲线; (f) 数十个操作周期切换

Fig. 3. Ga_2O_3 thin film detector: (a) $I-V$ curves of the photodetector in the dark and under 254 nm illumination; (b) $I-t$ curves operated at 254 nm and 365 nm illumination ($2.08 \text{ mW}/\text{cm}^2$); (c) $I-t$ curves of the photodetector under different light intensities of 254 nm with a bias voltage of 18 V; (d) photocurrent versus light intensity; (e) rise/decay curves; (f) over tens of operation cycles.

5 紫外电弧检测应用

为了测试探测器实际的电弧检测能力, 图 4(a) 中描绘的户外电弧测试系统, 包括一个脉冲电弧发生器、Ga₂O₃ 薄膜探测器、半导体分析仪以及一台电脑. 脉冲电弧发生器的输出电压大约 100 kV, 放电频率每秒 0.3—3 次, 能够有效地模仿高压线间的输送电压. 通过改变 Ga₂O₃ 薄膜探测器与脉冲电弧发生器之间的距离 (25—165 cm), 研究了 Ga₂O₃ 薄膜探测器对于该条件下产生的电弧的极限探测距离. 如图 4(b) 所示, 图中紫红色区域为电弧作用时间, 当测试距离为 25 cm 时, 能够明显观察到 Ga₂O₃ 薄膜探测器产生了脉冲光电流, 并且光电流的大小与实验室条件测得的结果相近. 当探测距离增加至 155 cm 时, 图 4(c) 中的脉冲光电流相比于图衰减了 10 倍, 主要归因于日盲紫外线辐照强度的减弱. 图 4(d) 的探测距离进一步增大, Ga₂O₃ 薄膜探测器探测前的暗电流与探测后的光电流保持在相同水平, 并且两者之间不存在明显区分界限. 因此, 本 Ga₂O₃ 薄膜探测器对于输出电压为 100 kV 左右产生的电弧的极限探测距离为 155 cm.

6 结论与展望

本文报道了具备日盲紫外响应性能的 Ga₂O₃ 薄膜光电探测器. 相较于传统的薄膜探测器制备工艺, MEMS 工艺制备的特殊悬臂式电极结构能够有效保护内部电路, 保证顶层功能薄膜结构的完整与组分的均匀, 克服了传统刻蚀电极电路工艺对功能薄膜的损伤. 通过射频磁控溅射技术在悬臂式电极结构表面沉积非晶态 Ga₂O₃ 薄膜, 为低成本量产微型探测器提供了一种新的技术途径. 在 18 V 偏压和 2.08 mW/cm² 的 254 nm 光照条件下, 所得 Ga₂O₃ 薄膜光电探测器的光响应度为 0.364 A/W, 探测率为 7.9×10¹⁰ Jones, 外量子效率为 1779%, 上升和下降时间分别为 1.22 s 和 0.24 s. 在户外日光环境下, 对于输出电压为 100 kV 的脉冲电弧, 该探测器能够完成极限距离为 155 cm 的灵敏检测. 总体来说, 得益于由 MEMS 工艺的悬臂式电极结构开发的敏感功能薄膜沉积技术, 本文制备的 Ga₂O₃ 薄膜光电探测器对日盲紫外线展示良好的探测性能, 尤其是对脉冲电弧的检测. 然而直接将该探测器投入到电弧检测应用尚不能满足

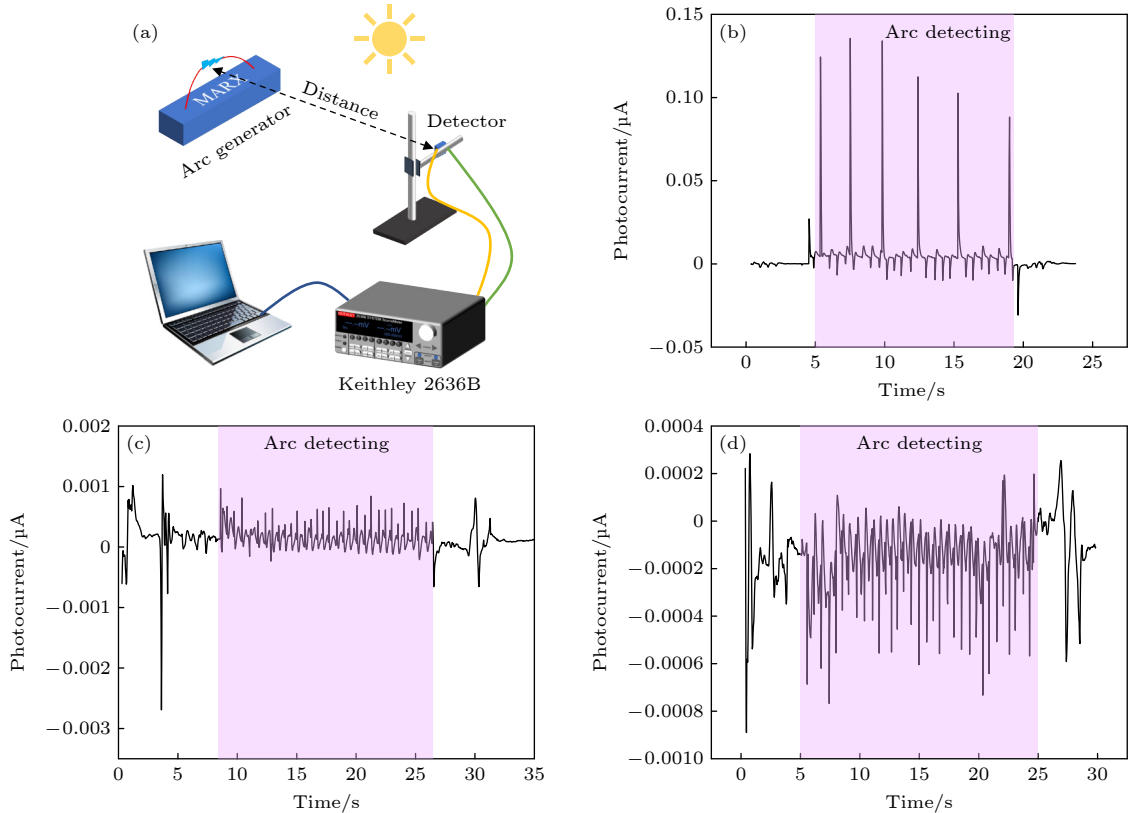


图 4 (a) 户外电弧检测系统; 电弧与探测器距离 (b) 25 cm, (c) 155 cm, (d) 165 cm 的响应曲线

Fig. 4. (a) Outdoor arc detection system; response curves for the arc to detector distances of (b) 25 cm, (c) 155 cm and (d) 165 cm.

实际应用需求, 还需进一步提升探测器的紫外探测性能并借助于精密的光学聚焦系统, 有待在后续的工作中加以改进.

参考文献

- [1] 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
- [2] Wu Z P, Jiao L, Wang X L, Guo D Y, Li W H, Li L H, Huang F, Tang W H 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 8688
- [3] Chen M X, Zhao B, Hu G F, Fang X S, Wang H, Wang L, Luo J, Han X, Wang X D, Pan C F, Wang Z L 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1706379
- [4] Sheoran H, Kumar V, Singh R 2022 *ACS Appl. Electron. Mater.* **4** 2589
- [5] Yan Z Y, Li S, Liu Z, Zhi Y S, Dai J, Sun X Y, Sun S Y, Guo D Y, Wang X, Li P G, Wu Z P, Li L L, Tang W H 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 4502
- [6] Yan Z Y, Li S, Liu Z, Liu W J, Qiao F, Li P G, Tang X, Li X H, Yue J Y, Guo Y F, Tang W H 2022 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **28** 3803208
- [7] Liu Z, Li S, Yan Z Y, Liu Y Y, Zhi Y S, Wang X, Wu Z P, Li P G, Tang W H 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 5071
- [8] Yan Z Y, Li S, Yue J Y, Liu Z, Ji X Q, Yang Y, Li P G, Wu Z P, Guo Y, Tang W H 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 57619
- [9] Li S, Guo D Y, Li P G, Wang X, Wang Y, Yan Z Y, Liu Z, Zhi Y S, Huang Y, Wu Z P, Tang W H 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 35105
- [10] Li S, Zhi Y S, Lu C, Wu C, Yan Z Y, Liu Z, Yang J, Chu X, Guo D Y, Li P G, Wu Z P, Tang W H 2021 *J. Phys. Chem. Lett.* **12** 447
- [11] Fu S, Wang Y, Gao C, Han Y, Fu R, Wang L, Li B, Ma J, Fu Z, Xu H, Liu Y 2023 *IEEE Electron Device Lett.* **44** 1428
- [12] Li X, Xu F, Wang X, Luo J, Ding K, Ye L, Li H, Xiong Y, Yu P, Kong C, Ye L, Zhang H, Li W 2023 *Phys. Status Solidi RRL* DOI:10.1002/pssr.202200512
- [13] Wang J, Luo L B 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 7 (in Chinese) [王江, 罗林保 2021 *中国激光* **48** 7]
- [14] Gao C, Wang Y, Fu S, Xia D, Han Y, Ma J, Xu H, Li B, Shen A, Liu Y 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 38612
- [15] 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, 郭宇锋, 唐为华 2022 *物理学报* **71** 208501]
- [16] Ni S, Chen Q, Liu J, Yang S, Li T, Yang X, Zhao J 2019 *J. Power Sources* **433** 126681
- [17] Prabakar K, Venkatachalam S, Jeyachandran Y L, Narayandass S K, Mangalaraj D 2004 *Mater. Sci. Eng. B* **107** 99
- [18] Onuma T, Saito S, Sasaki K, Masui T, Yamaguchi T, Honda T, Higashiwaki M 2015 *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 112601
- [19] Li S, Yue J Y, Ji X Q, Lu C, Yan Z Y, Li P G, Guo D Y, Wu Z P, Tang W H 2021 *J. Mater. Chem. C* **9** 5437
- [20] Chen Y C, Lu Y J, Liao M Y, Tian Y Z, Liu Q, Gao C J, Yang X, Shan C X 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1906040
- [21] Chen Y C, Lu Y J, Liu Q, Lin C N, Guo J, Zang J H, Tian Y Z, Shan C X 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 2557
- [22] Zhi Y S, Liu Z, Zhang S H, Li S, Yan Z Y, Li P G, Tang W H 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 3435
- [23] Lu Y C, Zhang Z F, Yang X, He G H, Lin C N, Chen X X, Zang J H, Zhao W B, Chen Y C, Zhang L L, Li Y Z, Shan C X 2022 *Nano Res.* **15** 7631
- [24] Pearton S J, Yang J, Cary P H, Ren F, Kim J, Tadjer M J, Mastro M A 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 011301
- [25] Yang C, Liang H, Zhang Z, Xia X, Tao P, Chen Y, Zhang H, Shen R, Luo Y, Du G 2018 *RSC Adv.* **8** 6341
- [26] Arora K, Goel N, Kumar M, Kumar M 2018 *ACS Photonics* **5** 2391
- [27] Sun P, Yang X, Li K, Wei Z, Fan W, Wang S, Zhou W, Shan C 2023 *Adv. Mater. Interfaces* DOI: 10.1002/admi.202300371
- [28] Xu R, Ma X, Chen Y, Mei Y, Ying L, Zhang B, Long H 2022 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **144** 106621
- [29] He M, Zeng Q, Ye L 2023 *Crystals* **13** 1434
- [30] Zhang C, Liu K, Ai Q, Huang X, Chen X, Zhu Y, Yang J, Cheng Z, Li B, Liu L, Shen D 2022 *J. Phys. Chem. C* **126** 21839
- [31] Kufer D, Nikitskiy I, Lasanta T, Navickaite G, Koppens F H, Konstantatos G 2015 *Adv. Mater.* **27** 176
- [32] 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]
- [33] Yu J, Lou J, Wang Z, Ji S, Chen J, Yu M, Peng B, Hu Y, Yuan L, Zhang Y, Jia R 2021 *J. Alloys Compd.* **872** 159508
- [34] Gu K Y, Zhang Z L, Huang H F, Tang K, Huang J, Liao M Y, Wang L J 2023 *J. Mater. Chem. C* **11** 5371
- [35] Luo J X, Gao H L, Deng J X, Ren J H, Zhang Q, Li R D, Meng X 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 028502 (in Chinese) [落巨鑫, 高红丽, 邓金祥, 任家辉, 张庆, 李瑞东, 孟雪 2023 *物理学报* **72** 028502]
- [36] Xi Z Y, Yang L L, Shu L C, Zhang M L, Li S, Shi L, Liu Z, Guo Y F, Tang W H 2023 *Chin. Phys. B* **32** 088502
- [37] Wang J, Xiong Y, Ye L, Li W, Qin G, Ruan H, Zhang H, Fang L, Kong C, Li H 2021 *Opt. Mater.* **112** 110808
- [38] Ren Q, Xu W, Shen Z, You T, Liu Q, Liu C, Zhao L, Chen L, Yu W 2020 *ACS Appl. Electron. Mater.* **3** 451
- [39] Almaev A, Nikolaev V, Kopyev V, Shapenkov S, Yakovlev N, Kushnarev B, Pechnikov A, Deng J, Izaak T, Chikiryaka A, Scheglov M, Zarichny A 2023 *IEEE Sens. J.* **23** 19245
- [40] Zhang M, Ma W, Li S, Yang L, Liu Z, Guo Y, Tang W H 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 2336
- [41] Liu Z, Zhi Y S, Zhang M L, Yang L L, Li S, Yan Z Y, Zhang S H, Guo D Y, Li P G, Guo Y F, Tang W H 2022 *Chin. Phys. B* **31** 088503

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

Zhang Yu¹⁾ Liu Rui-Wen²⁾³⁾ Zhang Jing-Yang¹⁾

Jiao Bin-Bin²⁾³⁾ Wang Ru-Zhi^{1)†}

1) (Key Laboratory of Advanced Functional Materials of Education Ministry of China, Institute of New Energy Materials, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

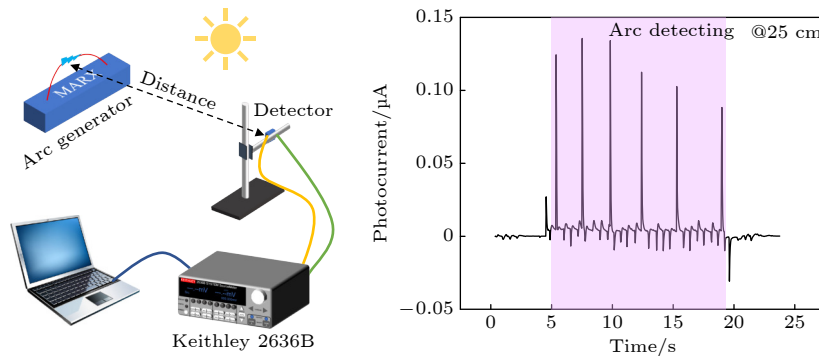
2) (Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

3) (University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

(Received 28 January 2024; revised manuscript received 18 February 2024)

Abstract

The performance of gallium oxide (Ga_2O_3) thin film detector based on metal-semiconductor-metal (MSM) is highly dependent on the uniformity of the Ga_2O_3 thin film, and the manufacturing process is quite sophisticated, which poses a challenge for the scale-up and mass production of thin film photodetectors. In this work, an MSM Ga_2O_3 thin film solar-blind photodetector with five-finger interdigital electrodes is fabricated by physically depositing Ga_2O_3 thin film on the surface of a mass-produced cantilevered thin film chip. Through the microelectromechanical system (MEMS) process, the cantilever electrode structure is prepared, which protects the internal circuit and the integrity of the thin film. The Ga_2O_3 thin film treated by argon plasma at a low temperature is amorphous, but the photodetector still possesses considerable ultraviolet detection performance. At a bias voltage of 18 V, it approaches the detection performance of crystalline Ga_2O_3 thin film, with a detectivity of 7.9×10^{10} Jones, an external quantum efficiency of 1779%, rise time and decay time of 1.22 s and 0.24 s, respectively. Moreover, a system of arc detection is built in outdoor environments. Without any optical focusing system, this photodetector achieves sensitive detection of pulsed arc in an outdoor sunlight environments. For pulsed arcs with an output voltage of 100 kV, the photodetector is capable of sensitive detection at a distance of 25 cm. Besides, the maximum detection distance of 155 cm indicates that the photodetector will have a favorable potential application value in the field of solar-blind detection. This work develops a sensitive functional thin film deposition technology based on the cantilever electrode structure fabricated by the MEMS process, which avoids the influence of the large-area uniformity of the functional thin film on the etching circuit. It provides a new technical approach and process route for preparing MSM photodetectors.



Keywords: gallium oxide, solar-blind photodetector, arc detection

PACS: 85.60.Gz, 85.30.-z, 81.15.Cd

DOI: 10.7498/aps.73.20240186

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFB3500403).

† Corresponding author. E-mail: wrz@bjut.edu.cn

氧化镓悬臂式薄膜日盲探测器及其电弧检测应用

张裕 刘瑞文 张京阳 焦斌斌 王如志

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

Zhang Yu Liu Rui-Wen Zhang Jing-Yang Jiao Bin-Bin Wang Ru-Zhi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 098501 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240186

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240186>

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

超宽禁带半导体 β -Ga₂O₃ 及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展

Ultra-wide bandgap semiconductor of β -Ga₂O₃ and its research progress of deep ultraviolet transparent electrode and solar-blind photodetector

物理学报. 2019, 68(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181845>

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>

势垒可调的氧化镓肖特基二极管

Barrier-tunable gallium oxide Schottky diode

物理学报. 2022, 71(3): 037301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211536>

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>

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>

基于机械剥离 β -Ga₂O₃的Ni/Au垂直结构肖特基器件的温度特性

Temperature dependent characteristics of Ni/Au vertical Schottky diode based on mechanically exfoliated β -Ga₂O₃ single crystal

物理学报. 2020, 69(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200424>