

基于云母衬底生长的非晶 Ga_2O_3 柔性透明日盲紫外光探测器研究

玄鑫淼 王加恒 毛彦琦 叶利娟 张红 李泓霖 熊元强 范嗣强 孔春阳 李万俊

Flexible transparent solar blind ultraviolet photodetector based on amorphous Ga_2O_3 grown on mica substrate

Xuan Xin-Miao Wang Jia-Heng Mao Yan-Qi Ye Li-Juan Zhang Hong Li Hong-Lin Xiong Yuan-Qiang
Fan Si-Qiang Kong Chun-Yang Li Wan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 238502 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211039

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211039>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于云母衬底生长的非晶 Ga_2O_3 柔性透明日盲紫外光探测器研究*

玄鑫森 王加恒 毛彦琦 叶利娟[†] 张红 李泓霖
熊元强 范嗣强 孔春阳 李万俊[‡]

(重庆师范大学物理与工程学院, 光电功能材料重庆市重点实验室, 重庆 401331)

(2021年6月1日收到; 2021年7月2日收到修改稿)

基于宽禁带半导体材料氧化镓 (Ga_2O_3) 制备日盲深紫外 (UV) 光电探测器是当前研究的热点课题之一, 但如何制备出高性能的 Ga_2O_3 基日盲探测器应用于柔性透明光电子领域仍然存在挑战. 本文采用射频磁控溅射技术在柔性云母衬底上生长了具有高透射率的非晶 Ga_2O_3 薄膜. 在此基础上, 采用铝掺杂氧化锌 (AZO) 作为电极材料, 制备了非晶 Ga_2O_3 薄膜基金属-半导体-金属 (MSM) 结构的透明日盲深紫外光电探测器, 并系统对比分析了平面状态和多次弯曲后的器件性能. 结果表明, 非晶 Ga_2O_3 基透明探测器具有超高的可见光透明度, 并显示出良好的日盲紫外光电特性. 器件在 254 nm 光照下的响应率为 2.69 A/W, 响应和恢复时间为 0.14 s/0.31 s. 经过 300 次机械弯曲后, 器件具有与其平面状态相近的光响应行为, 器件性能没有发生明显的衰减现象, 表现出良好的柔韧性和稳定性. 本工作证实了 AZO 薄膜可作为下一代柔性和可见光透明的 Ga_2O_3 基探测器的电极材料, 并为研制高性能柔性透明日盲深紫外探测器提供一定参考.

关键词: Ga_2O_3 薄膜, 非晶态, 日盲紫外探测器, 透明, 柔性

PACS: 85.30.-z, 85.60.Gz, 78.66.-w, 61.82.Fk

DOI: 10.7498/aps.70.20211039

1 引言

日盲紫外光电探测器由于其极低的自然背景噪声、灵敏度高、抗干扰性强、误报率低等优点, 在军事和民用领域有着广泛的应用, 如导弹跟踪、火灾探测、安全通信、化学/生物分析等^[1-5]. 近年来, 制备日盲光电探测器的材料主要集中在宽禁带半导体材料, 如 AlGaIn ^[6]、 ZnMgO ^[7]、金刚石^[8] 和 Ga_2O_3 ^[9-11] 等. Ga_2O_3 是一种禁带宽度在 4.5—5.2 eV 的直接带隙宽禁带氧化物半导体材料, 因其较高的击穿电场 (~ 8 MV/cm)、良好的热化学稳定性、较低的制

作成本和可在可见光区域有较高的透过率等优势, 且避免了复杂和不可控的合金化过程, 被认为是研制日盲光电探测器的理想材料之一^[12-14]. 目前, Ga_2O_3 材料已被用于日盲光电探测器活性层, 包括块状晶体、薄膜和各种纳米等结构^[15-17]. 其中, 薄膜型日盲探测器以良好的可重复性、易生长、更方便的实际应用等优点受到人们的广泛关注.

在许多新兴的应用中, 柔性透明电子器件引起了人们的极大兴趣, 具有光学透明和机械柔性的光电子器件为制备下一代可视且兼容的光电子器件奠定了基础. 柔性透明的日盲光电探测器是可穿戴的监测和传感系统的核心. 迄今为止, 大多数报告

* 国家自然科学基金 (批准号: 11904041)、重庆市自然科学基金 (批准号: cstc2020jcyj-msxmX0557, cstc2019jcyj-msxmX0237) 和重庆市教育委员会科学技术研究项目 (批准号: KJQN201900542, KJ1703042) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ylj2592924@163.com

[‡] 通信作者. E-mail: liwj@cqu.edu.cn

的 Ga_2O_3 基光电探测器是在刚性衬底上制备的^[18]. 近来, 基于柔性 Ga_2O_3 基光电探测器的相关研究也逐步得到关注, 常常使用的柔性衬底主要是聚合物材料, 如聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)^[19], 聚酰亚胺 (PI)^[20], 聚萘二甲酸乙二醇酯 (PEN)^[21]. 在这些柔性探测器件中, 往往采用贵金属作为电极材料, 但贵金属电极本质上是不透光, 不可折叠的导体, 导致其在柔性电子器件的应用和实施方面有较大的限制^[22]. 而透明导电氧化物作为电极材料不仅能解决上述问题的同时, 还具有好的透光性, 是研制全透明柔性光电探测器的优选电极材料^[23]. 例如, Naveen Kumar 等^[24] 利用磁控溅射在 Ga_2O_3 薄膜上沉积非晶铟锌氧化物 (a-IZO) 透明导电电极, 制备了具有较高透明度和光电响应的光电探测器, 研究了在重复弯曲循环下 a-IZO 电极和传统银 (Ag) 金属电极制备的非晶 Ga_2O_3 光电探测器的柔韧性, 发现在 30 cm 弯曲半径及 500 次拉伸/释放循环后, 采用 a-IZO 电极制备的 Ga_2O_3 光电探测器表现出更为优异的柔韧性. 尽管已有柔性衬底及透明电极应用于日盲探测器的报道, 但基于氧化镓研制柔性全透明的日盲紫外探测器的研究较少^[24].

为此, 本文通过射频磁控溅射技术在新型柔性衬底云母上沉积非晶态 Ga_2O_3 薄膜, 并基于非晶态 Ga_2O_3 薄膜制备金属-半导体-金属 (MSM) 结构的柔性全透明日盲光电探测器, 选用 AZO 作为透明电极材料. 研究了平面状态及弯曲 300 次后的器件光电特性, 针对器件性能变化对比分析, 器件表现出良好的柔韧性及较高的光电响应.

2 实验过程

本实验利用射频磁控溅射法在柔性衬底云母 (mica) 薄片上 (尺寸为 30 mm × 10 mm, 厚度约为 0.04 mm) 制备了 Ga_2O_3 薄膜. 溅射前, 将衬底按酒精、丙酮和去离子水的顺序在超声波清洗机各清洗 10 min. 溅射时, 以高纯陶瓷 Ga_2O_3 (纯度为 99.99%) 陶瓷靶 (直径为 100 mm) 作为溅射靶材, 腔体本底真空度为 5×10^{-4} Pa, Ar 气流量为 40 sccm, 工作压强为 2 Pa, 溅射时间 1.5 h, 溅射功率为 150 W. 利用 X 射线衍射仪 (XRD, Bruker D8 ADVANCE A25 X) 对薄膜的晶体结构进行表征 (Cu $K\alpha$ 辐

射, λ 为 0.154 nm). 采用具有 Ar 离子激光器 ($\lambda = 532$ nm) 作为激发源的 Raman 系统 (HR Evolution, JY Labram) 进行 Raman 散射光谱的测量. 通过 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析元素组成及化学状态. 借助日立 U-4100 紫外可见红外分光光度计测量薄膜在可见光及紫外区域的透射和吸收光谱. 运用光电探测测试系统, 分别对制备的 MSM 结构型的 Ga_2O_3 薄膜基日盲紫外探测器的平面状态及疲劳试验后的器件性能进行检测分析. 其中, 用 Keithley 2450 测量了 Ga_2O_3 薄膜日盲探测器的电流与电压的关系 ($I-V$) 及光响应随时间变化的关系 ($I-t$); 采用 6 W 的汞灯作为光源, 为紫外响应测量提供 254 和 365 nm 波长的光. 所有实验过程均在室温下进行.

3 结果与分析

图 1(a) 给出了在云母 (mica) 衬底上生长的 Ga_2O_3 薄膜 ($\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{mica}$) 的 XRD 图谱, 其中 mica 衬底的 XRD 图谱用于对比分析. 从图 1(a) 中可以看出, 除了来自 mica 衬底的特征峰外^[25-27], 并未观察到与 Ga_2O_3 晶体相关的特征衍射峰, 说明常温环境下在 mica 衬底上生长的 Ga_2O_3 薄膜为非晶态. 同样的结论在 Raman 光谱中也能观察到, 如图 1(b) 所示. 发现除了来自 mica 衬底的振动模式外^[28], 未见 Ga_2O_3 晶体相关振动模式, 进一步证实了在 mica 衬底上直接沉积的为非晶 Ga_2O_3 薄膜. 图 1(c) 和图 1(d) 分别给出了非晶态 Ga_2O_3 薄膜的 Ga 2p 和 O 1s 的 XPS 谱. Ga 2p 的核心能级谱分为 Ga 2p_{1/2} 和 Ga 2p_{3/2}, 其结合能分别对应于 1145.2 和 1118.2 eV, 二者差值约为 27 eV, 这与 Ramana 等^[29] 报道的实验结果相一致. 从图 1(d) 中可以观察到 O 1s 的结合能位于 531.5 eV 附近. 基于高斯拟合分析, O 1s 核心能级谱可分为三部分: 1) (530.4 ± 0.1) eV (O_1), O_1 与晶格位置中的 O^{2-} 离子有关; 2) (531.3 ± 0.1) eV (O_2), O_2 与缺氧区域中的 O^{2-} 离子有关, 且通常被用于表征氧化物中的氧空位 (V_O) 缺陷; 3) (532.3 ± 0.1) eV (O_3), O_3 对应于薄膜表面的化学吸附物质^[30]. 从图 1(d) 中明显可以观察到 O 1s 具有较强的 O_2 峰, 表明非晶 Ga_2O_3 薄膜中存在大量的氧空位施主缺陷.

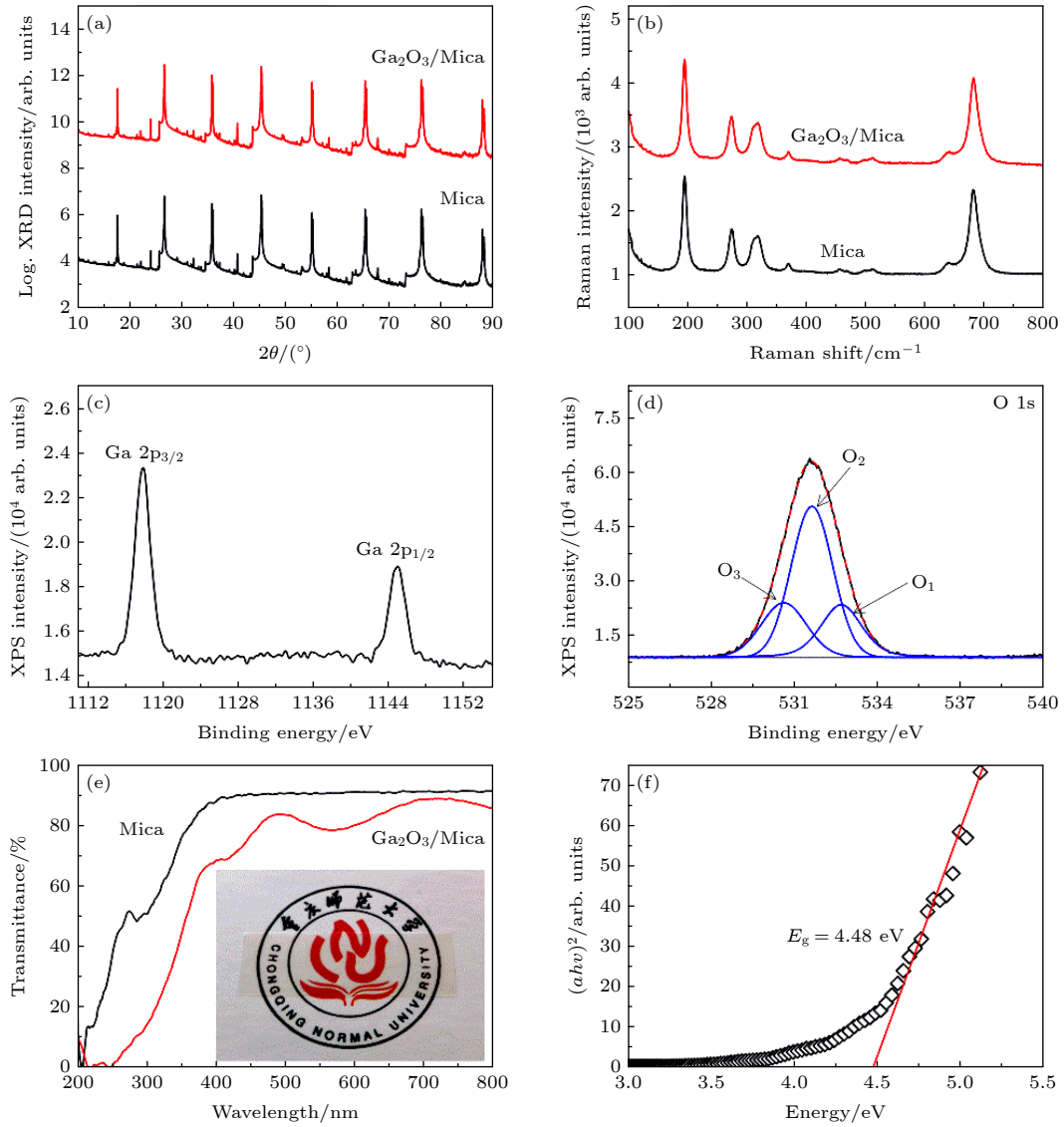


图 1 柔性衬底云母上沉积的 Ga_2O_3 薄膜 (a) XRD 图谱; (b) Raman 散射光谱; (c) Ga 2p 核心能级谱; (d) O 1s 核心能级谱; (e) 紫外可见光透射光谱 (插图为样品放置于 LOGO 上的照片); (f) $(\alpha h\nu)^2$ 随光子能量 ($h\nu$) 的变化关系

Fig. 1. (a) The XRD pattern, (b) Raman scattering spectra, (c) Ga 2p core level spectra, (d) O 1s core level spectra, (e) optical transmittance spectra (the photograph of the as-grown Ga_2O_3 film is depicted in the inset) and (f) the variation of $(\alpha h\nu)^2$ with photon energy ($h\nu$) of the Ga_2O_3 film deposited on flexible mica substrate, respectively.

图 1(e) 给出了生长在云母衬底上的非晶的透射光谱, 可以看出, 非晶 Ga_2O_3 薄膜在 400—800 nm 区域内的平均透过率超过 80%, 表现出较高的透过率. 图 1(e) 插图显示了样品放置在 LOGO 上的实物图, 透过样品能清晰地看到底层 LOGO 图样, 进一步表明在柔性衬底 mica 上沉积的非晶态 Ga_2O_3 薄膜具有较高的透明度, 可用于制备全透明日盲紫外光电器件. 此外, 相比 Mica 衬底的吸收边, $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{mica}$ 吸收边明显发生了红移. 图 1(f) 显示了 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{mica}$ 薄膜的 $(\alpha h\nu)^2$ 随光子能量 ($h\nu$) 的变化关系. 众所周知, 对于直接带隙半导体材料, 光学带隙

(E_g) 可根据吸收光谱图用 Tauc plots 法来计算, 其方程为 [12,31]

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

其中 α 是吸收系数; $h\nu$ 是入射光子能量; A 是常数. 因此由图 1(f) 所示, Ga_2O_3 薄膜的 E_g 可以通过 $(\alpha h\nu)^2$ 到 $h\nu$ 的线性区域外推得到, 计算出在柔性衬底云母上沉积的非晶态 Ga_2O_3 薄膜的光学带隙约为 4.48 eV, 这与报道的值非常接近 [32].

为了研究在云母柔性衬底上生长的非晶态 Ga_2O_3 薄膜的日盲紫外光电性能, 基于非晶 Ga_2O_3 薄膜制备了 MSM 型日盲紫外探测器, 示意图如

图 2(a) 所示. 在非晶 Ga_2O_3 薄膜的表面上沉积三对叉指电极, 电极材料选用 AZO 透明导电氧化物薄膜 (可见光区域平均透过率高于 90%, 载流子浓度超过为 10^{20} cm^{-3}), 取代 Au 等贵金属, 制备非晶 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明的日盲紫外探测器. 电极的宽度、长度和间距分别为 $200 \mu\text{m}$, $2800 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$, 有效深紫外光辐照面积为 0.03 cm^2 . 柔性透明日盲探测器置于 LOGO 上的实物照片如图 2(b) 所示. 明显地, 穿过探测器可以清晰地观察到底部

LOGO 的图案及文字, 表明非晶 Ga_2O_3 薄膜基柔性日盲紫外探测器具有较高的可见光透明度.

图 2(c) 分别显示了非晶 Ga_2O_3 薄膜柔性透明日盲紫外探测器在黑暗、365 和 254 nm 光照条件下的 I - V 特性曲线 (对数坐标). 由图 2(c) 可见, 在黑暗条件下, 偏置电压为 5 V 时, 暗电流约为 $0.36 \mu\text{A}$, 这与非晶态 Ga_2O_3 薄膜具有较高的缺陷密度有关, 特别是与氧空位 (V_O) 缺陷相关 [33]. 与黑暗条件下的 I - V 曲线相比, 365 nm 光照下的光电流有微小

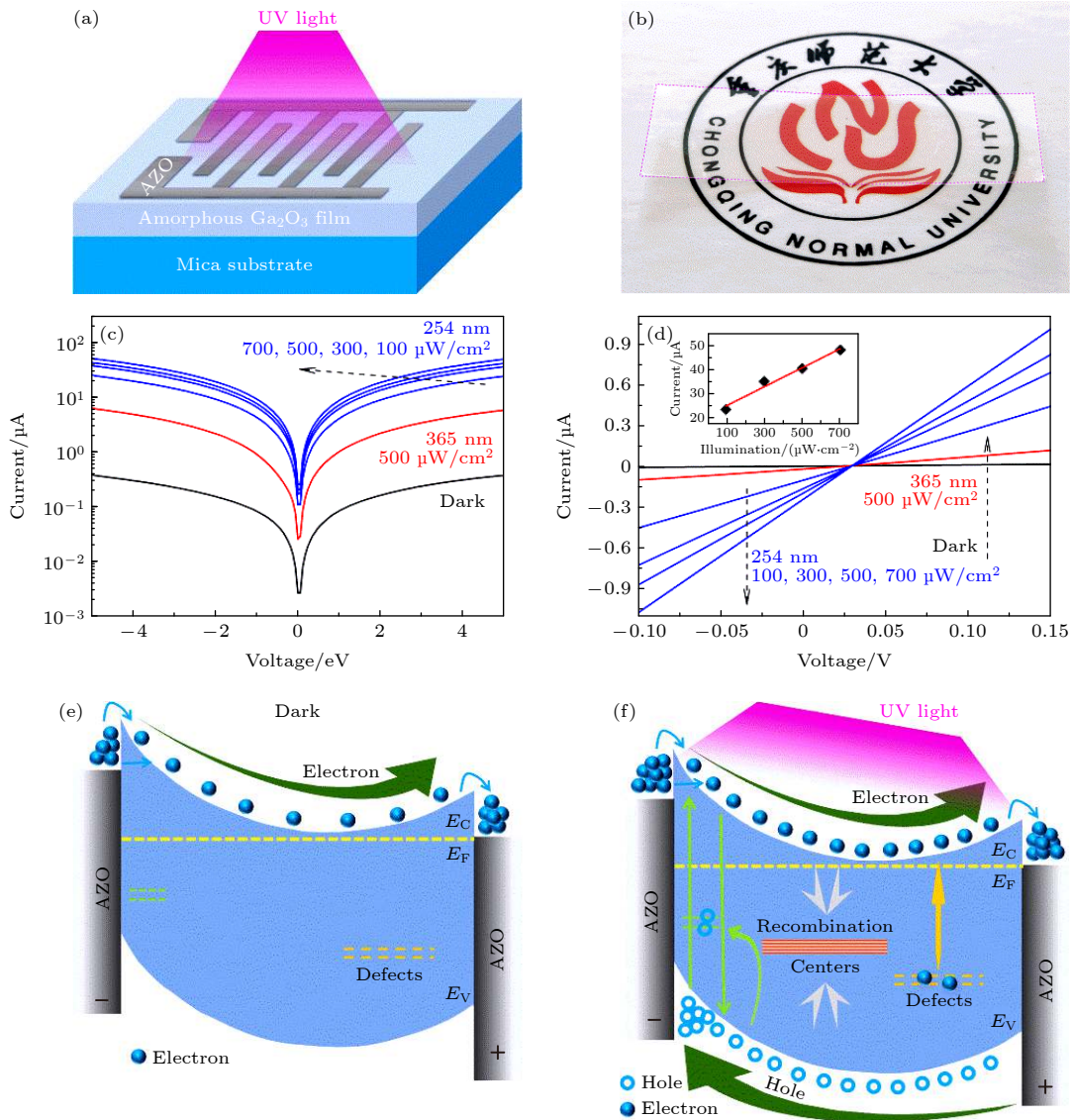


图 2 平面状态下非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器: (a) MSM 型器件示意图; (b) 置于 LOGO 上的实物照片; (c) 在黑暗条件下, 365 和 254 nm 光照下的 I - V 曲线 (对数坐标); (d) 在 -0.10 — 0.15 V 偏置电压内的 I - V 曲线放大图, 插图为 5 V 偏压下光照强度与光电流之间的关系; (e) 黑暗条件下的能带示意图; (f) 254 nm 光照下的能带示意图

Fig. 2. (a) The schematic diagram of the MSM photodetector; (b) the photograph of the Ga_2O_3 PD; (c) I - V characteristics in dark, under 365 and 254 nm illumination (in a logarithmic coordinate); (d) the enlarged view of the I - V characteristics at a bias voltage of -0.10 to 0.15 V , and the inset shows the relationship between the light intensity and photocurrent under 5 V bias; (e) schematic energy band diagrams in dark; (f) schematic energy band diagrams under 254 nm light illumination of the flexible transparent solar-blind photodetector based on amorphous Ga_2O_3 films deposited on mica substrate, respectively.

的增加,表明非晶态 Ga_2O_3 薄膜对 365 nm 的紫外光有一定的响应但不敏感,主要归因于非晶 Ga_2O_3 薄膜较大的带隙,使电子不能在 365 nm 光照的激发下从价带跃迁到导带^[3]. 相比之下,当探测器暴露在 254 nm 光照下时,电流显示出急剧的跳跃,表现出强烈的光响应特性. 当光强为 $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,光电流达到 $40.78 \mu\text{A}$. 以上说明在云母衬底上生长的非晶 Ga_2O_3 薄膜基柔性日盲紫外探测器可有效应用于日盲紫外探测,并显示出良好的光谱选择性和光电特性^[33,34]. 响应率 (R) 定义为入射光在光导体有效面积上每单位功率产生的光电流,可用下面的方程来描述^[3,10]:

$$R = \frac{I_\lambda - I_d}{P_\lambda S}, \quad (2)$$

其中 I_λ 是光电流; I_d 是暗电流; P_λ 是光强; S 是有效照明面积. 利用上述方程及实验值 ($I_\lambda = 40.78 \mu\text{A}$, $I_d = 0.36 \mu\text{A}$, $P_\lambda = 500 \text{ W}/\text{cm}^2$, $S = 0.03 \text{ cm}^2$), 可推算出在偏置电压为 5 V 时,柔性透明器件对日盲紫外光 (254 nm, 光强为 $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) 的 R 为 2.69 A/W, 显示出较高的响应率.

图 2(d) 显示了在 -0.10 — 0.15 V 偏置电压范围内,非晶 Ga_2O_3 薄膜柔性透明日盲紫外探测器 I - V 特性曲线的放大图. 由 I - V 特性呈明显的线性关系可以判断,非晶态 Ga_2O_3 薄膜与 AZO 电极之间形成了优异的欧姆接触. 当重掺杂的 AZO 同高表面态密度的非晶 Ga_2O_3 接触时会形成窄的势垒区宽度,这时电子电流除了热发射电流外,还有隧道效应贯穿势垒产生较大的隧道电流,当隧道电流超过热发射电流而占据主导时,得到近似理想的欧姆接触. 相比肖特基接触,欧姆接触势垒较低,接触电阻极小,有利于载流子的运输^[33]. 图 2(d) 中插图显示了光电流与光照强度间的关系,随着 254 nm 波长的入射光强度不断增加,在 5 V 偏压下的光电流几乎呈线性增加,这是由于较高的光强可激发更多的光生电子空穴对,从而产生更高的光电流^[3]. 图 2(e) 和图 2(f) 分别显示了非晶 Ga_2O_3 薄膜柔性透明日盲紫外探测器在黑暗条件和 254 nm 光照下的能带示意图. 由于非晶态 Ga_2O_3 薄膜 ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) 存在大量的空位缺陷 (尤其是氧空位) 以及结构无序、晶界、悬空键等^[33], 导致薄膜内部缺陷浓度较高,且 AZO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 界面的接触势垒较低,促进了电子输运过程中的电子隧穿,因此该器件具有较大的光暗电流^[34]. 在光照下,高密度的缺陷促进了

非平衡载流子的重组,氧空位中的许多俘获电子可以被光激发到非晶态 Ga_2O_3 的导带上^[34]. 同时,光生空穴和电离氧空位在偏置电压下漂移到 AZO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 界面,并与势垒区的电子陷阱重新结合,从而缩小势垒宽度,增加光电流,导致了更高的光导增益.

为了进一步评估非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器的光响应稳定性,通过周期性的打开/关闭波长为 254 和 365 nm 的紫外光,其光强均为 $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. 在 5 V 偏压下测试了探测器的时间依赖光响应特性曲线,如图 3(a) 所示. 该器件能在“开”和“关”状态间轻松切换,并在多个周期后仍表现出几乎相同的光响应,表明非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器具有较高的器件稳定性和可重复性^[35]. 通常情况下,器件光响应的响应(上升)沿和恢复(衰减)沿由两部分组成,分别是快速响应和慢速响应部分^[36]. 紫外光照被打开/关闭时,光生载流子快速产生/湮灭^[37],决定了光响应的快速响应分量. 缺陷作为有效光生载流子的俘获/释放态,促进俘获/释放的隧穿过程^[5,38],决定了光响应的慢速响应分量^[39]. 为了更详细地研究光电流响应时间,了解探测器对传入信号的响应速度,可通过如下所示的双指数函数拟合上升和衰减过程进行定量分析^[17]:

$$I = I_0 + Ae^{-t/\tau_1} + Be^{-t/\tau_2}, \quad (3)$$

其中 I_0 是稳态光电流; A 和 B 是常数; t 是时间, τ_1 和 τ_2 为两个弛豫时间常数. 通过拟合单循环,可计算出非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器的上升时间 (τ_r) 和衰减时间 (τ_d) 的值,如图 3(f) 所示. 结果表明拟合得到的曲线与在 254 nm 光照条件下获得的实验曲线具有较好地拟合度,上升时间 τ_{r1}/τ_{r2} 约为 0.14 s/1.15 s, 衰减时间常数 τ_{d1}/τ_{d2} 约为 0.31 s/3.82 s, 与同类光电探测器相比,该器件响应时间较短,具有优异的响应速度^[3,10,24]. 综合以上结果表明,非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器在平面状态下具有良好的日盲光电性能,为进一步研究器件的柔韧性和稳定性奠定坚实基础^[40].

图 4(a) 给出了评估非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器的柔韧性和稳定性的现场照片. 我们对器件在曲率半径 $r = 7.5 \text{ mm}$ 下进行机械弯曲试验,弯曲程度由一个可调节的台架控制,每次弯

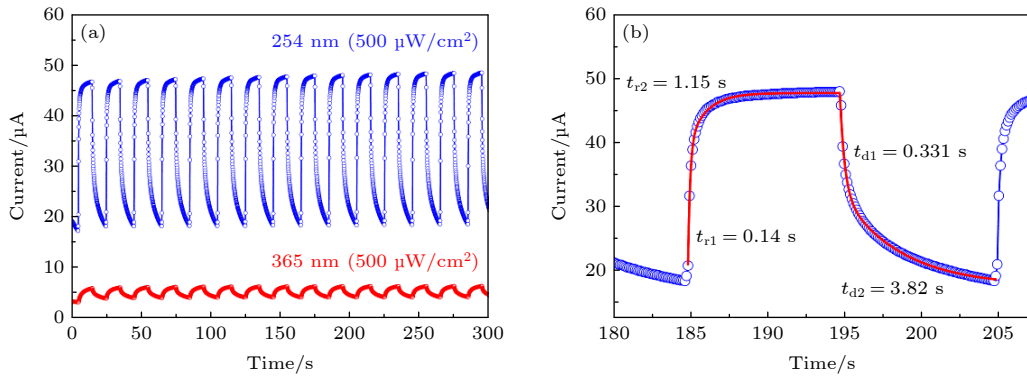


图 3 平面状态下非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器 (a) 在 254 和 365 nm 光照下的 $I-t$ 特性曲线; (b) 254 nm 光照下的上升/衰减边缘的放大视图和相应的指数拟合

Fig. 3. (a) Time-dependence photocurrent characteristics under the 254 and 365 nm illumination; (b) the enlarged view of the rise/decay edges and the corresponding exponential fitting under 254 nm illumination of the flexible transparent solar-blind photodetector based on amorphous Ga_2O_3 films deposited on mica substrate, respectively.

曲/释放周期均保持曲率半径不变. 器件经过 300 次弯曲后, 对其进行光电流-电压曲线 ($I-V$) 和时间响应的测试. 图 4(b) 显示了非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器在黑暗条件下, 365 和 254 nm 光照下的对数坐标 $I-V$ 特性曲线. 在 5 V 偏压下, 254 nm 紫外光照射 ($500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) 产生的光电流可达到 $33.07 \mu\text{A}$, 疲劳试验后的该柔性透明光电探测器仍然具有良好的光响应. 这与云母衬底较高的柔韧性, AZO 电极与 Ga_2O_3 薄膜良好的黏连性和持久的附着力^[24], Ga_2O_3 的非晶结构及其抗弯曲、抗拉伸的优点有关^[41]. 图 4(c) 给出了光电流与光照强度的关系. 可见, 经过 300 次机械弯曲试验后, 器件光电流依然随着 254 nm 波长的入射光强度呈线性增加, 表明器件产生的光电流主要取决于紫外光照下光生载流子的数量^[42]. 图 4(d) 显示了非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器在 $-0.10-0.15 \text{ V}$ 偏置电压内的 $I-V$ 特性曲线. 可以判断, 经过 300 次弯曲/释放周期后, 并未破坏非晶态 Ga_2O_3 薄膜与 AZO 电极的接触, 仍然保持良好的欧姆接触. 为了更准确全面地评估机械弯曲试验对非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器光响应性能的影响, 根据 (2) 式及相关的实验数值 ($I_\lambda = 33.07 \mu\text{A}$, $I_d = 2.94 \mu\text{A}$, $P_\lambda = 500 \text{ W}/\text{cm}^2$, $S = 0.03 \text{ cm}^2$), 可推算出在偏置电压为 5 V 时, 柔性透明器件对日盲紫外光 (254 nm, 光强 $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) 的 R 为 $2.01 \text{ A}/\text{W}$, 这与未进行机械弯曲试验前的响应率相近, 都显示出较高的响应率. 此外, 通过周期性的打开/关闭波长为 254 和 365 nm 的紫外光 (光强均为 $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), 在 5 V 偏压下研究了

非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器机械弯曲后的时间依赖光响应特性曲线, 以进一步评估机械弯曲试验对器件的光响应稳定性的影响, 如图 4(e) 所示. 从图 4(e) 中可以看出, 即使经过 300 次弯曲/释放循环, 该器件仍然能在多个周期后表现出与平面状态器件几乎相同的光响应, 进一步表明器件具有较强的稳定性、可重复性和柔韧性. 通过拟合单循环, 可计算出非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器经过机械弯曲试验后的上升时间 (τ_r) 和衰减时间 (τ_d) 的值, 如图 4(f) 所示. 结果表明上升时间 τ_{r1}/τ_{r2} 约为 $0.15 \text{ s}/1.19 \text{ s}$, 衰减时间常数 τ_{d1}/τ_{d2} 约为 $0.24 \text{ s}/3.62 \text{ s}$, 与未进行机械弯曲试验之前相比, 器件在机械弯曲 300 次后仍保持快速响应的优点.

综上所述, 基于云母衬底的非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器在进行机械弯曲前后均保持良好的日盲光电探测能力, 具有较高的响应率和较快的响应/恢复速度, 且其结构简单, 成本低廉, 兼具高柔韧性, 可见光透明, 高稳定性和可重复性等优点, 表明基于云母衬底的非晶态 Ga_2O_3 薄膜基日盲探测器有望在高性能柔性透明光电子领域展现巨大潜力.

4 结 论

本文采用射频磁控溅射技术成功在云母柔性衬底上制备了 Ga_2O_3 薄膜, 研究了 Ga_2O_3 薄膜的结构和光学特性, 确定了制备的样品为非晶态 Ga_2O_3 薄膜, 其在可见光的平均透过率超过 80%.

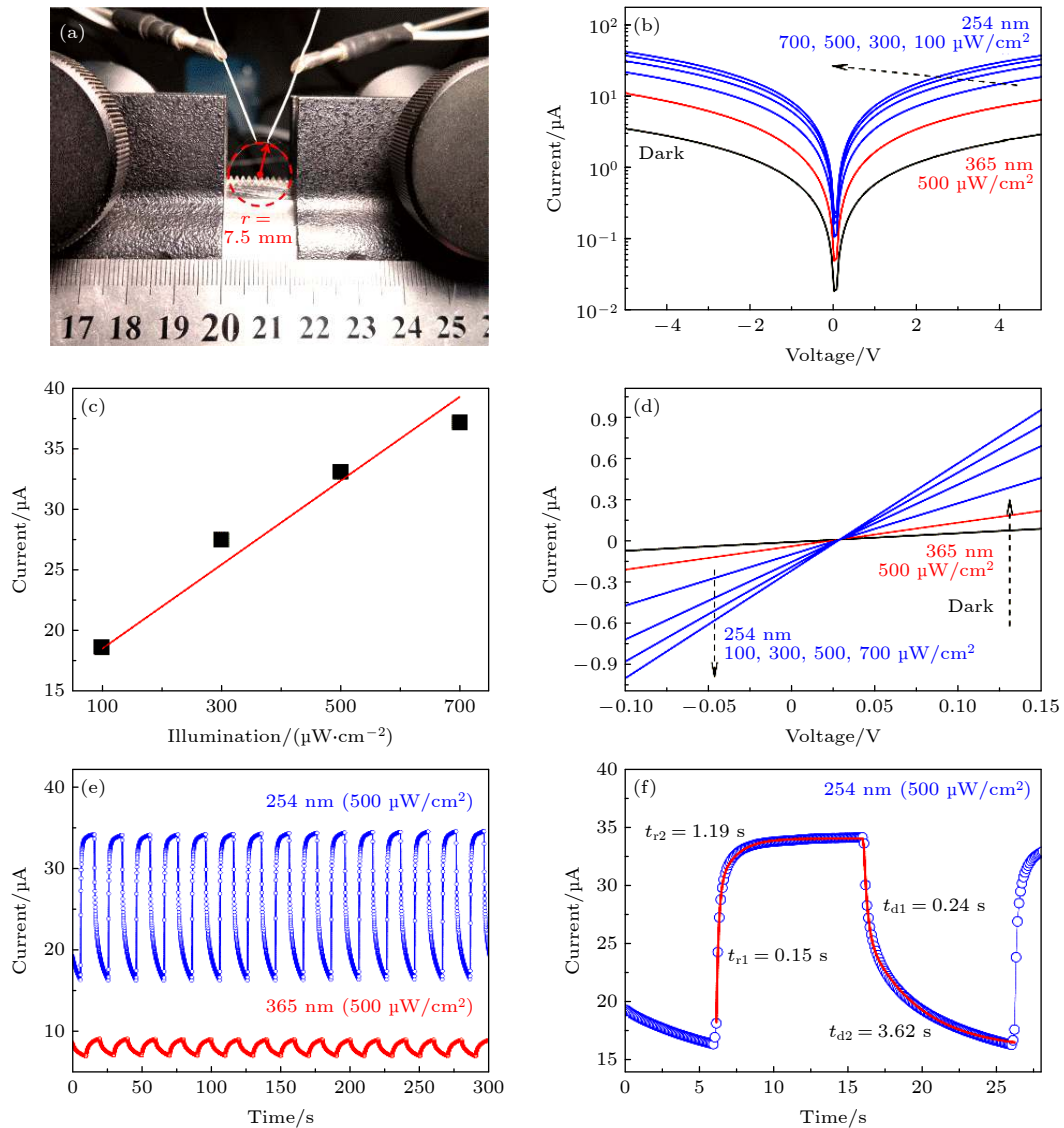


图 4 非晶态 Ga_2O_3 薄膜基柔性透明日盲探测器在曲率半径 $r = 7.5$ mm 条件下, 经 300 次弯曲后器件性能 (a) 弯曲实验下柔性装置的原位照片; (b) 在黑暗条件下, 365 和 254 nm 光照下的 I - V 特性曲线 (对数坐标); (c) 光照强度与光电流之间的关系; (d) 在 -0.10 — 0.15 V 偏置电压内的 I - V 特性曲线放大图; (e) 在 254 和 365 nm 光照下的 I - t 特性曲线; (f) 254 nm 光照下的上升/衰减边缘的放大视图和相应的指数拟合

Fig. 4. (a) An in-situ photograph of the flexible PD under a bending test; (b) I - V characteristics in dark, under 365 and 254 nm illumination (in a logarithmic coordinate); (c) the relationship between the light intensity and photocurrent; (d) the enlarged view of the I - V characteristics at a bias voltage of -0.10 to 0.15 V; (e) time-dependence photocurrent characteristics under the 254 and 365 nm illumination; (f) the enlarged view of the rise/decay edges and the corresponding exponential fitting under 254 nm illumination of the flexible transparent solar-blind photodetector based on amorphous Ga_2O_3 films after bending 300 cycles with $r = 7.5$ mm, respectively.

基于云母衬底生长的非晶 Ga_2O_3 薄膜, 采用 AZO 透明导电薄膜作为电极材料, 制备了非晶 Ga_2O_3 薄膜基 MSM 结构的可见光透明的日盲深紫外光电探测器. 器件在 254 nm 光照下器件的响应率为 2.69 A/W, 响应和恢复时间为 0.14 s/0.31 s. 经过 300 次机械弯曲后, 器件的响应率为 2.01 A/W, 响应和恢复时间为 0.15 s/0.24 s, 其性能没有发生明显的衰减现象, 表现出良好的柔韧性和稳定性, 证

实了 AZO 透明导电薄膜可作为柔性和可见光透明的 Ga_2O_3 基探测器的电极材料.

参考文献

- [1] Li Y B, Tokizono T, Liao M Y, Zhong M, Koide Y, Yamada I, Delaunay J J 2010 *Adv. Funct. Mater.* **20** 3972
- [2] Chen X H, Ren F F, Gu S L, Ye J D 2019 *Photonics Res.* **7** 381
- [3] Wang S L, Sun H L, Zeng X H, Ungar D, Guo D Y, Shen J

- Q, Li A P, Li C R, Tang W H 2019 *J. Alloys Compd.* **787** 133
- [4] Guo D Y, Su Y L, Shi H Z, Li P G, Zhao N, Ye J H, Wang S L, Liu A P, Chen Z, Li C R, Tang W H 2018 *ACS Nano* **12** 12827
- [5] Li P G, Shi H Z, Chen K, Guo D Y, Cui W, Zhi Y S, Wang S L, Wu Z Z, Chen Z W, Tang W H 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 10562
- [6] Chen Y R, Zhang Z W, Jiang H, Li Z M, Miao G Q, Song H 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 4936
- [7] Chen X, Liu K W, Wang X, Li B H, Zhang Z Z, Xie X H, Shen D Z 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 10645
- [8] Lu Y J, Lin C N, Shan C X 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800359
- [9] Guo D Y, Wu Z P, Li P G, An Y H, Liu H, Guo X C, Yan Y, Wang G F, Sun C L, Li L H, Tang W H 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 1067
- [10] Kong W Y, Wu G A, Wang K Y, Zhang T F, Zou Y F, Wang D D, Luo L B 2016 *Adv. Mater.* **28** 10725
- [11] Luan S Z, Dong L P, Jia R X 2019 *J. Cryst. Growth* **505** 74
- [12] Wang J, Ye L J, Wang X, Zhang H, Li L, Kong C, Li W J 2019 *J. Alloys Compd.* **803** 9
- [13] Du X J, Li Z, Luan C N, Wang W G, Wang M X, Feng X J, Xiao H D, Ma J 2015 *J. Mater. Sci.* **50** 3252
- [14] Pratiyush A S, Krishnamoorthy S, Solanke S V, Xia Z B, Muralidharan R, Rajan S, and Nath B 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 221107
- [15] Chen X H, Han S, Lu Y M, Cao P J, Liu W J, Zeng Y X, Jia F, Xu W Y, Liu X K, Zhu D L 2018 *J. Alloys Compd.* **747** 869
- [16] Arora K, Goel N, Kumar M, Kumaret Mal 2018 *ACS Photonics* **5** 2391
- [17] Du J Y, Xing J, Ge C, Liu H, Liu P Y, Hao H Y, Dong J J, Zheng Z Y, Gao H 2016 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **49** 425105
- [18] Chen X H, Ren F F, Ye J D, Gu S L 2020 *Semicond. Sci. Technol.* **35** 023001
- [19] Yadav A, Upadhyaya A, Gupta S K, Verma A S, Negi C M S 2019 *AIP Conf. Proc.* **2142** 150022
- [20] Li Z, Xu Y, Zhang J Q, Cheng Y L, Chen D Z, Feng Q, Xu S R, Zhang Y C, Zhang J C, Hao Y, Zhang C F 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 1
- [21] Xiao S Y, Deng Y, Chen Z Y, Wang Y H, Yu J, Tang W H, Tang W H, Wu Z P 2020 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **53** 484004
- [22] Lee P, Lee J, Lee H, Yeo J, Hong S, Nam K H, Lee D, Lee S S, Koo S H 2012 *Adv. Mater.* **24** 3326
- [23] Huang Z, Ke S, Zhou J, Zhao Y, Huang W, Chen S, Li C 2021 *Chin. Phys. B* **30** 037303
- [24] Kumar N, Arora K, Kumar M 2019 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **52** 335
- [25] Qi H, Xia X, Zhou C, Xiao P, Wang Y, Deng Y 2020 *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.* **31** 3042
- [26] Taruta S, Ichinose T, Yamaguchi T, Kitajima K 2006 *J. Non-cryst. Solids* **352** 5556
- [27] Gao Q, Wu X, Fan Y, Du C 2016 *Ceram. Int.* **42** 6595
- [28] Chen Y, Fan L, Fang Q, Xu W, Chen S, Zan G B, Hui R, Li S, Zou C W 2017 *Nano Energy.* **31** 144
- [29] Ramana C V, Rubio E J, Barraza C D, Ramana C V, Rubio E J, Barraza C D, Miranda G A, McPeak S, Kotru S, Grant J T 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 043508
- [30] Wang J, Xiong Y Q, Ye L J, Li W J, Qin G P, Ruan H B, Zhang H, Fang L, Kong C Y, Li H L 2021 *Opt. Mater.* **112** 110808
- [31] Manandhar S, Ramana C V 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 061902
- [32] Guo D Y, Li P G, Chen Z W, Wu Z P, Tang W H 2019 *Act. Phys. Sin.* **68** 078501 (in Chinese) [郭道友, 李培刚, 陈政委, 吴真平, 唐为华 2019 物理学报 **68** 078501]
- [33] Qian L X, Wu Z H, Zhang Y Y, Lai P T, Liu X Z, Li Y R 2017 *ACS Photonics* **4** 2203
- [34] Guo D, Liu H, Li P G, Wu Z P, Wang S L, Cui C, Li C R, Tang W H 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 1619
- [35] Guo D, Qin X, Lv M, Shi H Z, Su Y L, Yao G S, Wang S L, Li C R, Li P G, Tang W 2017 *Electron. Mater. Lett.* **13** 483
- [36] Guo X C, Hao N H, Guo D Y, Wu Z P, An Y H, Chu X L, Li L H, Li P G, Lei M, Tang W H 2016 *J. Alloys Compd.* **660** 136
- [37] Shen H, Yin Y, Tian K, Baskaran K, Duan L, Zhao X, Tiwari A 2018 *J. Alloys Compd.* **766** 601
- [38] Chen K, He C, Guo D, Wang S L, Chen Z W, Shen J Q, Li P G, Tang W H, 2018 *J. Alloys Compd.* **755** 199
- [39] Rafique S, Han L, Zhao H 2017 *Phys. Status Solidi A* **214** 1700063
- [40] Oh S, Kim C K, Kim J 2017 *ACS Photonics* **5** 1123
- [41] Sun B, Zhang X, Zhou G D, Yu T, Mao S S, Zhu S H, Zhao Y, Xia Y D 2018 *J. Colloid Interface Sci.* **520** 19
- [42] Feng W, Wang X, Zhang J, Wang L F, Zheng W, Hu P A, Cao W W, Yang B 2014 *J. Mater. Chem. C* **2** 3254

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

Xuan Xin-Miao Wang Jia-Heng Mao Yan-Qi Ye Li-Juan[†] Zhang Hong
 Li Hong-Lin Xiong Yuan-Qiang Fan Si-Qiang
 Kong Chun-Yang Li Wan-Jun[‡]

(Chongqing Key Laboratory of Photo-Electric Functional Materials, College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

(Received 1 June 2021; revised manuscript received 2 July 2021)

Abstract

Solar-blind deep-ultraviolet (UV) photodetectors (PDs) based on the super-wide bandgap semiconductor material Ga₂O₃ is one of the hot topics of current research, but how to prepare high-performance Ga₂O₃-based solar-blind PDs in the field of flexible and transparent optoelectronics still faces challenges. In this work, an amorphous Ga₂O₃ film with high transmittance is grown on a flexible mica substrate by using the radio frequency magnetron sputtering technology. On this basis, using AZO as an electrode material, a transparent metal-semiconductor-metal (MSM) structured solar-blind deep ultraviolet photodetector based amorphous Ga₂O₃ film is fabricated, and the performance of PD in the planar state and after multiple bending are systematically compared and analyzed. The results show that the amorphous Ga₂O₃ based transparent PD has ultra-high visible light transparency and shows good solar-blind ultraviolet photoelectric characteristics. The responsivity of the PD under 254 nm light is 2.69 A/W, and the response time and the recovery time are 0.14 s and 0.31 s, respectively. After bending 300 times, the PD has a photoresponse behavior similar to its planar state, and the performance of the PD has no obvious attenuation phenomenon, showing good flexibility and stability. This work proves that AZO can be used as the electrode material of the next generation of flexible and visible light transparent Ga₂O₃ based photodetectors, and provides a reference for developing the high-performance flexible and transparent solar-blind deep ultraviolet photodetectors.

Keywords: Ga₂O₃ thin film, amorphous, solar-blind ultraviolet photodetector, transparent, flexible

PACS: 85.30.-z, 85.60.Gz, 78.66.-w, 61.82.Fk

DOI: 10.7498/aps.70.20211039

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11904041), the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant Nos. cstc2020jcyj-msxmX0557, cstc2019jcyj-msxmX0237), and the Science and Technology Research Project of Chongqing Education Committee, China (Grant Nos. KJQN201900542, KJ1703042).

[†] Corresponding author. E-mail: yj2592924@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: liwj@cqu.edu.cn