

专题: 功能氧化物薄膜新奇物理性质

基于 HfO_2 插层的 Ga_2O_3 基金属-绝缘体-半导体结构日盲紫外光电探测器*

董典萌 汪成 张清怡 张涛 杨永涛 夏翰驰 王月晖† 吴真平‡

(北京邮电大学理学院, 信息功能材料与器件实验室, 北京 100876)

(2022年11月20日收到; 2022年12月14日收到修改稿)

作为一种新兴的超宽带隙半导体, Ga_2O_3 在开发高性能的日盲紫外光电探测器方面具有独特的优势. 金属-半导体-金属结构因其制备方法简单、集光面积大等优点在 Ga_2O_3 日盲紫外光电探测器中得到了广泛的应用. 本文在传统的金属-半导体-金属结构 Ga_2O_3 日盲紫外光电探测器的基础上, 利用原子层沉积技术引入高介电性和绝缘性的氧化铪 (HfO_2) 作为绝缘层和钝化层, 制备出带有 HfO_2 插层的金属-绝缘体-半导体结构的 Ga_2O_3 日盲紫外光电探测器, 显著降低了暗电流, 提升了光暗电流比, 同时提高了器件的比探测率和响应速度, 为未来 Ga_2O_3 在高性能弱光探测器件制备提供了一种新通用策略.

关键词: 氧化镓, 紫外探测, 金属-绝缘体-半导体, 表面钝化**PACS:** 73.40.Qv, 73.40.Sx, 85.60.Gz**DOI:** 10.7498/aps.72.20222222

1 引言

日盲紫外光电探测器因其对波长处于 200—280 nm 波段 (日盲区) 紫外光的独特敏感性, 成为光谱探测中不可或缺的一部分, 在导弹跟踪、火灾预警、深空探测及环境监测等军事民事领域有着广泛的应用^[1]. 超宽带隙半导体材料, 如铝镓氮 (AlGa_3N)、镁锌氧 (MgZnO)、金刚石和氧化镓 (Ga_2O_3) 等已被用于制造紫外光电探测器^[2]. 相对于其他的超宽带隙半导体, Ga_2O_3 因其合适的禁带宽度 (~ 4.9 eV), 高的击穿场强 (~ 8 MV/cm), 材料制备方式便利, 对高温、高压、高辐射等极端环境耐受力高的优异物理特性, 被认为是日盲紫外光电探测器的理想材料^[3].

在过去的几年里, 人们致力于提高 Ga_2O_3 日盲紫外光电探测器的光电性能, 广泛研究了基于不

同结构的 Ga_2O_3 日盲紫外光电探测器, 主要包括金属-半导体-金属 (metal-semiconductor-metal, MSM) 结构的光导型光电探测器^[4,5]、肖特基型光电探测器^[6]以及异质结型光电探测器^[7-10]等. 然而, 由于 Ga_2O_3 光电探测器的大暗电流以及与缺陷明显相关的持续光导效应所导致的低探测率和光响应延迟, 其探测性能远远达不到恶劣环境下应用的要求^[11]. 据报道, 许多方法被用于降低暗电流或单方面减弱持续光电导效应, 包括 Ga_2O_3 外延薄膜内氧空位的填充^[12]、热弛豫^[13]和栅极调控^[14]等, 但都在性能上进行权衡, 比如热退火很好地提高了器件响应速度, 却以严重降低光响应电流为代价. 因此, 需要开发一种通用的基于 Ga_2O_3 日盲紫外光电探测器提高探测率和降低延迟响应的方法以适用于恶劣的环境. 传统 MSM 结构光导型光电探测器由于其制备工艺简单、集成度高、集光面积大等优点而展现出了非凡的潜力^[4,15], 虽然具有较

* 国家自然科学基金 (批准号: 12074044) 和信息光子学与光通信国家重点实验室开放基金 (批准号: IPOC2021ZT05) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yuehuiwang@bupt.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhenpingwu@bupt.edu.cn

快的响应速度,但依然存在着漏电流较大的问题.这些漏电流的产生原因主要集中在两个方面:一方面,在金属与 Ga_2O_3 薄膜接触界面,由于金属部分不稳定以及金属和半导体界面处发生相互扩散,导致了较大的漏电流^[16,17];另一方面,由于在蓝宝石或其他衬底上外延的 Ga_2O_3 薄膜表面依然存在着较高的位错密度,其薄膜表面态也会导致漏电流的产生^[18,19].为了降低 MSM 型结构探测器漏电流,提高 Ga_2O_3 基光电探测器的弱光探测性能,在金属和半导体层之间插入一层合适的绝缘层,可以提高金属半导体界面处的势垒高度,抑制金属半导体界面漏电流的产生,同时,可以在 Ga_2O_3 薄膜表面引入钝化层用于降低表面态对于器件的影响.因此,选取合适的材料作为绝缘层和钝化层是实现高性能器件的关键.

二氧化硅 (SiO_2)^[20]、氧化铝 (Al_2O_3)^[21]、氧化锆 (ZrO_2)^[22]、氧化铪 (HfO_2)^[15]、氮化铝 (AlN)^[23] 等常作为绝缘层被用于各种光电子器件及电力电子器件中.其中, HfO_2 由于具有更高的介电常数,不与 Ga_2O_3 发生化学反应且与探测器制备工艺更为兼容的特点,成为绝缘层的首选材料^[24].本文在 Ga_2O_3 基 MSM 结构光电探测器的基础上,利用原子层沉积技术在金属和半导体之间沉积一层致密的 HfO_2 薄膜作为绝缘层,设计了一种金属-绝缘体-半导体 (metal-insulator-semiconductor, MIS) 结构的 Ga_2O_3 基日盲紫外光电探测器,同时探究了 HfO_2 对于薄膜表面的钝化作用.对所制备器件的性能深入对比分析后发现,相比于传统 MSM 型光电探测器,引入 HfO_2 作为绝缘层制备的 MIS 型器件明显降低了器件的暗电流,显著提高了器件的光暗电流比,同时提高了探测器的比探测率和响应速度,利用 HfO_2 钝化 Ga_2O_3 薄膜表面后,器件性能有着进一步的提升.

2 实验部分

2.1 器件制备

薄膜制备过程中以三乙基镓 (TEGa, 99.999%) 和 O_2 (99.999%) 为前驱体,载气为高纯度氩气,利用金属有机化合物化学气相沉积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 技术在 $850\text{ }^\circ\text{C}$, 25 Torr ($1\text{ Torr}=1.33322\times 10^2\text{ Pa}$) 气流量条件下,分别在 3 片 (0006) 取向的 c 面蓝宝石衬底上 ($10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$) 沉积 700 nm 厚的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜.将得到的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜标记其中一片为样品 1; 另取一片采用原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) 技术在 Ga_2O_3 薄膜上沉积约 10 nm 厚的叉指图形 HfO_2 , 标记为样品 2; 最后一片同样采用 ALD 技术在 Ga_2O_3 薄膜上沉积一层约 10 nm 厚的 HfO_2 , 标记为样品 3. 利用磁控溅射在 3 个样品薄膜表面上沉积 $30/100\text{ nm}$ 厚的 Ti/Au 叉指电极,电极 (长 $2800\text{ }\mu\text{m}$, 宽 $200\text{ }\mu\text{m}$, 间距 $200\text{ }\mu\text{m}$, 4 对) 有效辐照面积为 0.0452 cm^2 . 图 1 展示了制备的器件结构示意图,采用传统的 MSM 结构型探测器 S1, 如图 1(a) 所示; 在叉指电极下契合图形化插入一层绝缘层 HfO_2 的 MIS 结构器件 S2, 如图 1(b) 所示; Ga_2O_3 层与金属电极层间覆盖一层 HfO_2 薄膜作为钝化层的 MIS-Passivation 结构的器件 S3, 如图 1(c) 所示.

2.2 样品表征及测试

本文采用 X 射线衍射仪 (XRD Bruker D8 ADVANCEA25X) 分析 Ga_2O_3 薄膜的晶体结构; 利用光谱椭偏仪 (SE-VE Spectroscopic Ellipsometer) 确定 Ga_2O_3 薄膜及 HfO_2 薄膜的厚度; 用分光光度计 (Macy UV-Vis 1900) 表征所制备薄膜的紫外-可见吸收光谱; 采用 254 nm 低压紫外灯

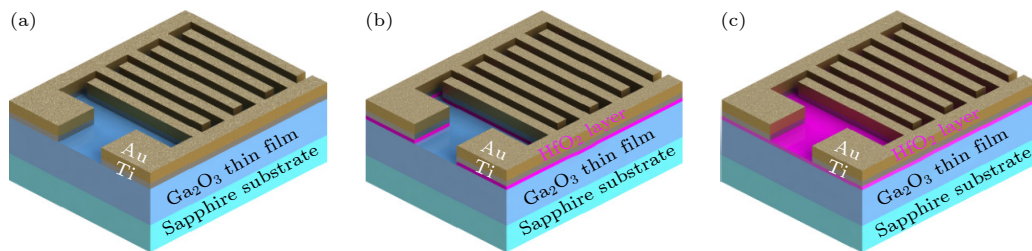


图 1 光电探测器结构示意图 (a) MSM 结构 S1; (b) MIS 结构 S2; (c) MIS-Passivation 结构 S3

Fig. 1. Schematic diagrams of the photodetector structure: (a) MSM structure S1; (b) MIS structure S2; (c) MIS-passivation structure S3.

作为光源在室温下用配备低噪音探针台的半导体测量系统 (Keithley 4200-SCS) 测试器件的光电性能.

3 结果与讨论

图 2 展示的是 (0006) 取向 *c* 面蓝宝石 (Al_2O_3) 及其外延的 Ga_2O_3 薄膜的经过 θ - 2θ 扫描的 XRD 图, 可以发现, 除去蓝宝石的衬底峰外, 在 18.90° , 38.37° , 59.08° 处有显著的峰, 分别对应 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的 ($\bar{2}01$), ($\bar{4}02$), ($\bar{6}03$) 的晶面取向, 可证明 MOCVD 沉积的薄膜为单一取向的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜.

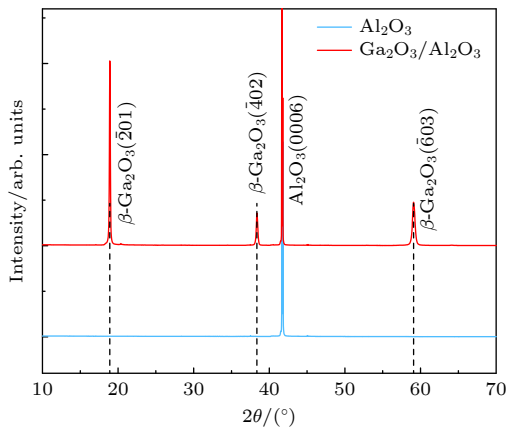


图 2 Al_2O_3 衬底上异质外延的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的 XRD 谱图
Fig. 2. XRD patterns of epitaxial growth of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ film on Al_2O_3 substrate.

对不同层结构的薄膜进行了紫外-可见光吸收谱的光学表征, 如图 3(a) 所示, 可以看出, 在小于 300 nm 的日盲紫外波段, 衬底 Al_2O_3 基本呈现光全透状态, HfO_2 薄膜在小于 218 nm 的波段才会有微弱的光吸收, 而 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜在 200—280 nm 日盲区域展示出很强的光吸收特性, 出现了陡峭的光学吸收边, 证明在蓝宝石上外延的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜具有优异的日盲紫外探测性能, 且沉积一层超薄的 HfO_2 薄膜并不影响 Ga_2O_3 对于深紫外波段的光吸收. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的禁带宽度 E_g 可利用 Tauc 理论计算得出, 其关系如下 [25]:

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

其中, α 是吸收系数, $h\nu$ 是入射光子能量, K 为常数, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 为直接带隙半导体 [25], n 为 1/2. 拟合结果如图 3(b) 所示, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜禁带宽度 E_g 约为 4.96 eV.

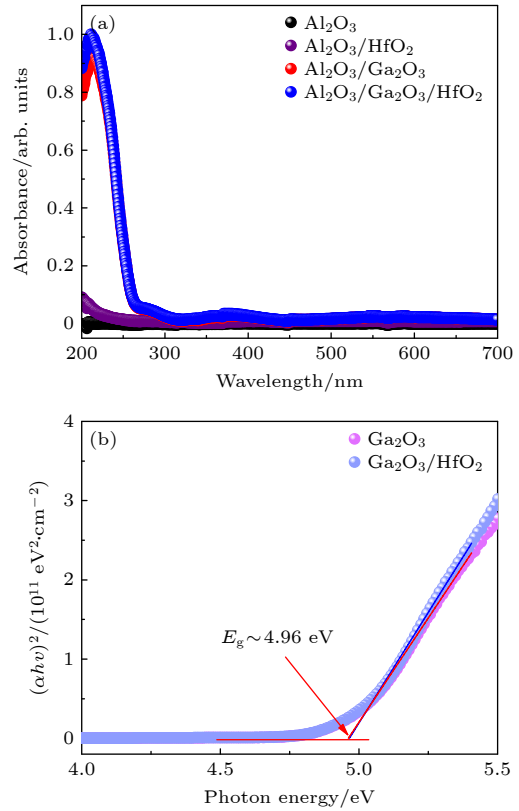


图 3 所制备薄膜的紫外-可见吸收谱图 (a) 不同薄膜的光学吸收特性曲线; (b) $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 关系曲线

Fig. 3. UV-vis absorption spectrum: (a) Optical absorption characteristics curves of different thin films; (b) the relationship of $(\alpha h\nu)^2$ and $h\nu$.

为了评估三种不同结构器件的日盲光响应性能, 测量了 S1, S2, S3 样品在黑暗和光照下 ($500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 254 nm) 的电流-电压 (I - V) 特性, 如图 4 所示. 通过对比发现, 在黑暗条件下, MSM 结构的光电探测器 S1 在 10 V 偏置电压下的暗电流为 2.53×10^{-12} A, 具有 HfO_2 绝缘层的 MIS 结构光电探测器 S2 有着更低的暗电流, 为 4.23×10^{-13} A, 而以 HfO_2 同时作为绝缘层和钝化层的 MIS 型光电探测器 S3 显示出比 S2 更低的暗电流, 达到了 4.29×10^{-14} A. 这是由于在金属与半导体接触界面插入 HfO_2 之后, HfO_2 作为金属与 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 界面的绝缘中间层, 提高了金属半导体接触界面的势垒高度, 从而有效地降低了暗电流. 与器件 S2 相比, S3 具有更低的暗电流, 因为 Ga_2O_3 薄膜表面中存在的位错等缺陷会产生较大的漏电流, 而在 Ga_2O_3 薄膜表面沉积的 HfO_2 绝缘层可以作为钝化层抑制表面漏电流. 器件引入 HfO_2 后, 其等效电路模型如图 4 插图所示, 其中 MIS 器件结构电容相当于绝缘层电容 C_i 和半导体空间电荷层电容 C_s 的串联. 在 10 V 偏

置电压, 光照强度为 $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外光照射下, 器件 S1, S2, S3 的光电流差别不明显, 分别为 5.17×10^{-9} , 3.89×10^{-9} 和 3.85×10^{-9} A, 可见器件 S2 和 S3 的光电流较 S1 并无显著降低.

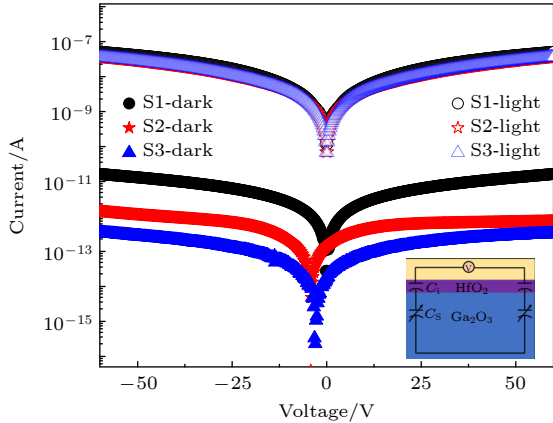


图 4 在黑暗和 254 nm 紫外光照条件下, 不同结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 紫外光电探测器的 I - V 特性曲线 (对数坐标) (插图为引入氧化铪后器件等效电路图)

Fig. 4. I - V curves (logarithmic coordinate) of different devices with and without 254 nm UV light irradiation (Inset is the equivalent circuit of the device after the insertion of HfO_2).

图 5 显示出测量的光电探测器 S1, S2, S3 的光谱响应, 可以发现, 三种不同结构的器件均对于 220—280 nm 波段的紫外光有响应, 且都在 250 nm 处呈现峰值响应, 截止波长约为 280 nm, 在其他波段并无响应. 紫外/可见抑制比定义为器件在紫外波段光响应度的最大值与 400 nm 光照下器件的响应度的比值, 器件 S1, S2, S3 在紫外可见光抑制比分别为 275, 289, 245, 展现出三种不同结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电探测器都具有良好的波长选择特性.

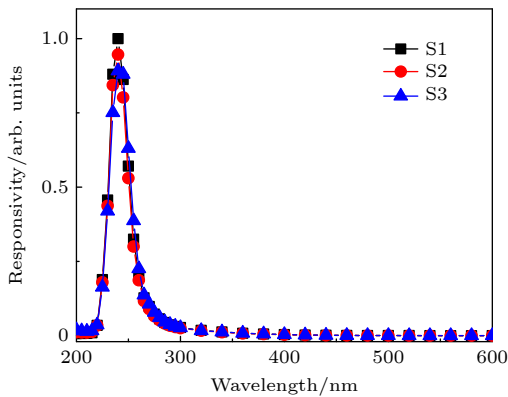


图 5 三个器件的光谱响应

Fig. 5. Spectral response of three devices.

光电流的大小与入射光的强度直接相关, 为了研究探测器对于入射光强度的依赖特性, 图 6(a) 给出了不同器件在 254 nm 光照下, 光电流与入射光强度的关系曲线, 在 $1\text{--}2000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 范围内, 随着入射光强度的增加, 探测器内的光生载流子的数量急剧增多, 光电流随之增大. 这种光电流与光强的关系可以通过

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

$$I_{\text{ph}} \approx \alpha P^\beta \quad (3)$$

表示 [26], 其中 I_{light} , I_{dark} 分别是有无光照时的电路输出电流, α 是与入射光有关的比例参数, 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, 描述了光电流与光强对应关系, 在理想情况下, 载流子在无缺陷的半导体内输运时 $\beta = 1$, 但由于外延过程中 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜不可避免地会引入缺陷, 器件内存在着复杂的电子空穴的产生、俘获和复合损耗, 指数 β 通常小于 1, 越接近 1 器件内的缺陷

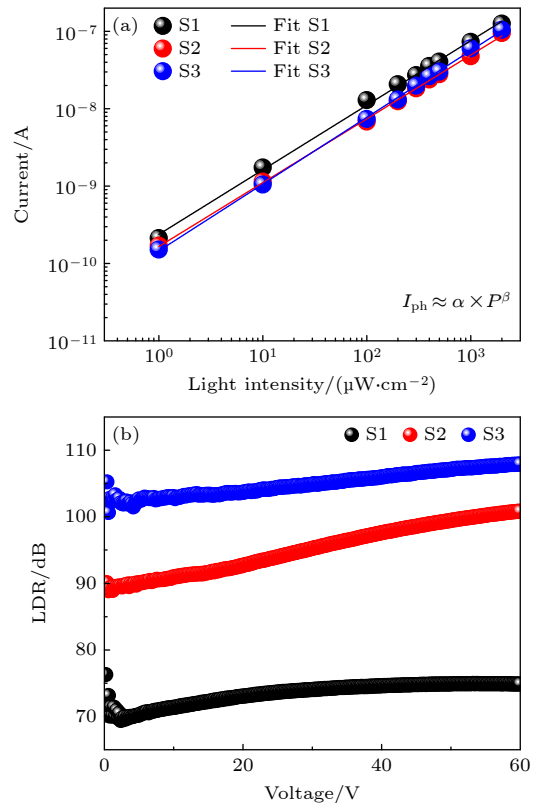


图 6 (a) 50 V 偏压下, 光电流与入射光功率强度的对应关系; (b) $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 254 nm 紫外光照射下, 线性动态范围与外部偏置电压的对应关系

Fig. 6. (a) Relationship of photocurrent and light intensity at 50 V bias; (b) linear dynamic range vs. external bias voltage under 254 nm light illumination with an intensity of $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

复合越少. 从图 6(a) 拟合曲线可知, 器件 S1, S2, S3 对应的指数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别为 0.83, 0.82, 0.86, 表明入射光强与光电流呈良好的线性关系.

此外, 线性动态范围 (linear dynamic range, LDR) 是描述光强与光电流的另一参数, 也是描述信号噪声比的重要因素, 可用关系式 (4)^[27] 表示:

$$\text{LDR} = 20\log(I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}). \quad (4)$$

如图 6(b) 所示, 测量得出三个器件在 $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的光强, 0—60 V 电压下的 LDR 值, 器件 S1, S2, S3 在 60 V 偏置电压下的最高 LDR 值分别为 75, 101 和 108 dB. 结果表明, 器件 S3 具有最高的 LDR 值, 意味着 S3 光电探测器具有较高的信噪比, 在一定范围内, 光电流随入射光强的变化而呈线性响应, 而超过这个范围, 光信号的强度就无法被精确地检测和计算出来^[28].

为了进一步定量评估制备的探测器 S1, S2, S3 的性能, 需要计算光暗电流比 (photo-to-dark current ratio, PDCR)、响应度 (responsivity, R)、外部量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 及比探测率 (detectivity, D^*) 等衡量探测器性能

的关键参数^[29], 其计算表达式为

$$\text{PDCR} = (I_{\text{ph}} - I_{\text{d}})/I_{\text{d}}, \quad (5)$$

$$R = (I_{\text{ph}} - I_{\text{d}})/(PS), \quad (6)$$

$$\text{EQE} = \frac{Rh\nu}{e} \times 100\%, \quad (7)$$

$$D^* = \frac{R \times \sqrt{S}}{\sqrt{2eI_{\text{d}}}}. \quad (8)$$

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), h 为普朗克常数, ν 为光的频率, e 为单位电荷量.

在不同入射光强下, 三个器件在固定的 50 V 电压下的光暗电流比如图 7(a) 所示. 可以看出, 随着入射光强度的增大, 器件的光暗电流比随之增大, 且与器件 S1 相比, 器件 S2, S3 的光暗电流比提升度大了 1 个数量级. 图 7(b) 展示了响应度随入射光强度的变化, 在 $1\text{--}2000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 范围内, 随着入射光强度增加, 响应度下降. 由于 HfO_2 的绝缘性, 器件 S2, S3 较 S1 光电流略有降低, 因此制备的探测器 S2, S3 相对于 S1 获得了相对小的响应度, S1, S2, S3 三个器件的响应度差值维持在

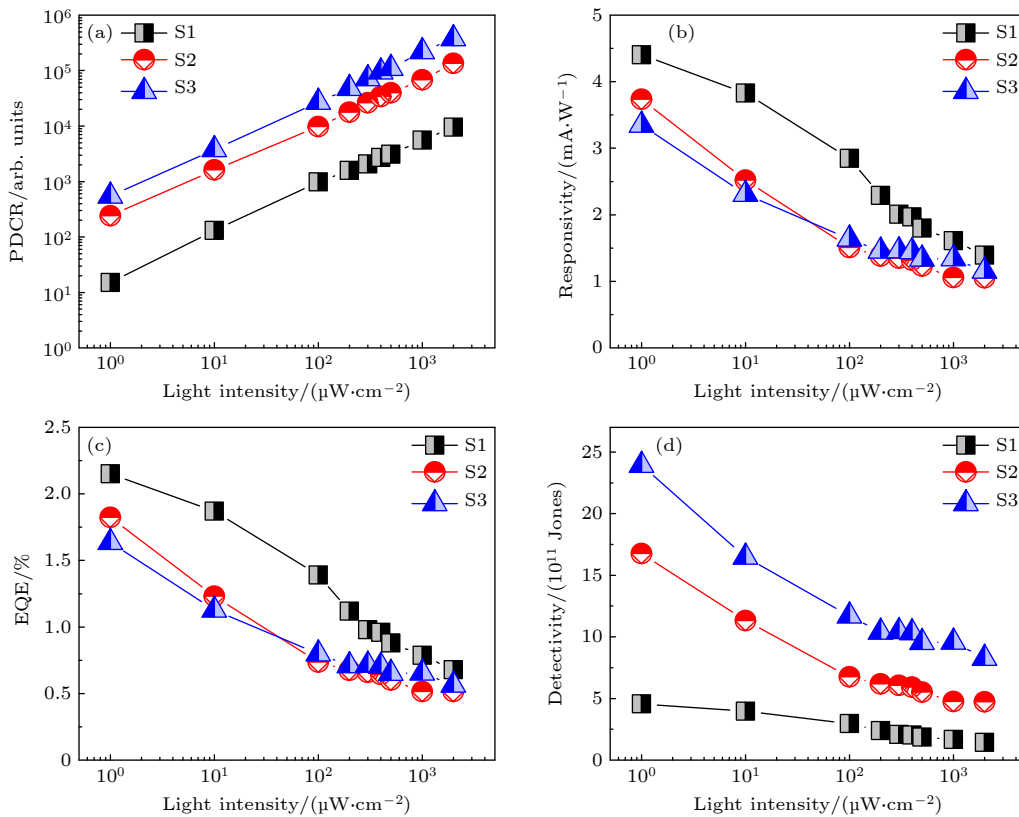


图 7 在 50 V 偏置电压下, 三种不同结构器件的性能参数 (a) PDCR, (b) R , (c) EQE 和 (d) D^* 随入射光强的变化曲线

Fig. 7. (a) PDCR and (b) R and (c) EQE and (d) D^* of the photodetectors replying on the light intensity under 50 V bias voltage.

一个较小的范围区间内, 三个器件的响应性能区别不大. EQE 是收集到的电子数与入射光子数之比, 其与响应度 R 有关^[30], 因而图 7(c) 展示出和图 7(b) 较为一致的结果. 器件比探测率与入射光强的关系如图 7(d) 所示, 比探测率随着入射光强度的增大也呈下降趋势, 这是因为随着入射光功率的增加, 自由电子数量和载流子散射率都会增加, 同时, 自由电子数量的增加也增加了光激发电子-空穴复合的概率, 从而导致光响应性的降低. 器件 S1, S2, S3 在 $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的入射光强下, 比探测率分别为 4.56×10^{11} , 1.68×10^{12} 和 2.39×10^{12} Jones, 而作为衡量光电探测器接收弱信号能力的重要性能参数, 显然, 在弱信号探测性能方面器件, 器件 S3 优于 S2 且优于 S1. 这进一步验证了 HfO_2 无论作为在金属半导体之间的绝缘层还是作为在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面的钝化层, 都对于所制备的探测器的弱信号探测能力均产生了积极的影响.

图 8 展示出当入射光强固定为 $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 三种不同结构的器件外部偏置电压与各性能参数的关系. 如图 8(a) 所示, 三个器件的 PDCR 数值在 3 V 以后保持着基本平稳的状态, 器件 S3 无

论在高电压还是在低压状态下都有着最大的光暗比. 由图 8(b) 和图 8(c) 可以发现, 三个器件的 R 和 EQE 均随着偏置电压的升高而增大, 器件 S1 优于 S3 且优于 S2, 说明电压越高, 电场强度越强, 越有利于光载流子的分离和漂移, 从而提高了两端电极的载流子收集效率, 由于绝缘层的引入导致光电电流减弱, 器件 S2, S3 的响应度和外部量子效率略有降低. 图 8(d) 展示了三个器件比探测率也随电压的升高而增大, 器件 S3 优于 S2 且优于 S1, 值得一提的是, 器件 S2, S3 比探测率随电压的上升速率也比 S1 快, 这表明探测器 S2 和 S3 在大电压的工作条件下拥有比探测器 S1 更好的工作性能.

另一个评估器件实际应用的重要指标是其对于周期性激励信号的实时监测^[31]. 在光连续开关的状态下得到的电流-时间 ($I-t$) 特性曲线可以用来衡量器件对于紫外光信号的灵敏特征及光响应稳定性. 在 20 V 的偏置电压, $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 入射光强下, 通过周期性的切换光源信号开关, 探究三个不同结构的器件 S1, S2 和 S3 对于 254 nm 紫外光的响应特性, 得到的 $I-t$ 特性曲线如图 9(a) 所示. 可以发现, 在长时间内, 器件 S1, S2 和 S3 均展现

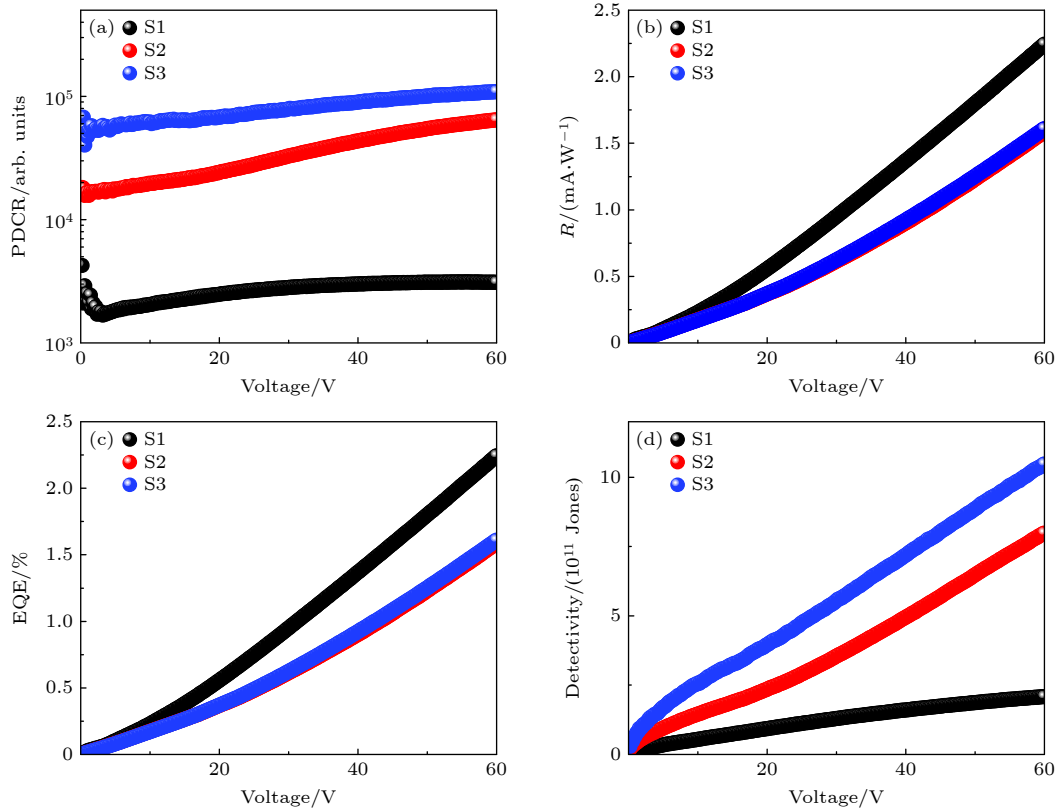


图 8 入射光强固定在 $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 三种不同结构器件的性能参数 (a) PDCR, (b) R , (c) EQE 和 (d) D^* 随偏置电压的变化
Fig. 8. (a) PDCR, (b) R , (c) EQE, and (d) D^* of the photodetector varies with the bias voltage under $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ illumination.

出良好的周期循环特征, 其中器件 S2 和 S3 并未因引入 HfO_2 绝缘层而影响器件的稳定性, 且响应区间基本维持在一定范围内. 为了深入对比探究三个器件的光响应特性, 通过用

$$I = I_0 + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

类型的指数松弛方程拟合时间响应曲线, 定量研究响应和衰减时间^[31], 其中, I_0 为稳态光电流, A 为常数, t 为时间, τ 是弛豫时间常数. 图 9(b)–(d) 展示了对应器件 S1, S2, S3 的上升和衰减时间的拟合结果, 上升沿和衰减沿的时间常数分别用 τ_r 和 τ_d 表示. 相比于器件 S1 的 τ_r/τ_d 为 0.71 s/0.26 s, 加入 HfO_2 绝缘层结构的 MIS 的 Ga_2O_3 光电探测器 S2 和 S3 有着更快的响应速度, τ_r/τ_d 分别达到 0.50 s/0.24 s 和 0.49 s/0.21 s. 这是由于 HfO_2 层插入到 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜和金属 Ti 接触界面后, 降低了界面态的缺陷浓度, 减弱了缺陷俘获的光生载流子的过程, 提高了器件的响应速度.

图 10 展示了不同类型探测器的能带结构, 及在固定的偏置电压下它们在黑暗和紫外光照条件

下的载流子的运输过程, 以便深入理解 MSM 型、MIS 型及 MIS-Passivation 型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜日盲紫外光电探测器的工作机理. MSM 型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜光电探测器在黑暗条件下的能带结构如图 10(a) 所示, 其中, E_c 为导带底能量, E_v 为价带顶能量, E_{F_s} 为 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的费米能级, E_{F_m} 为金属 Ti 费米能级. 由于载流子的金属-半导体界面的运输受半导体表面氧空位浓度、位错等缺陷态的影响, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜中存在较高密度的氧空位, 作为施主存在于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中, 提高了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 内部的载流子浓度, 降低了金属与 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜界面的势垒高度, 促进电子直接隧穿过势垒. 费米面会钉扎在氧空位等缺陷能级中, 这些缺陷, 特别是深层缺陷, 可能作为有效的俘获状态, 促进陷阱辅助隧穿, 从而导致了较大的暗电流. 紫外光照条件下的能带结构如图 10(b) 所示, 当器件 S1 被紫外光照射时, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜内产生大量电子-空穴对, 产生的光电子由价带直接跳跃至导带, 在电场的作用下, 电子向正极流入, 空穴流向负极, 载流子的相对运动形成光电流. MIS 型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜光电探测器的能带

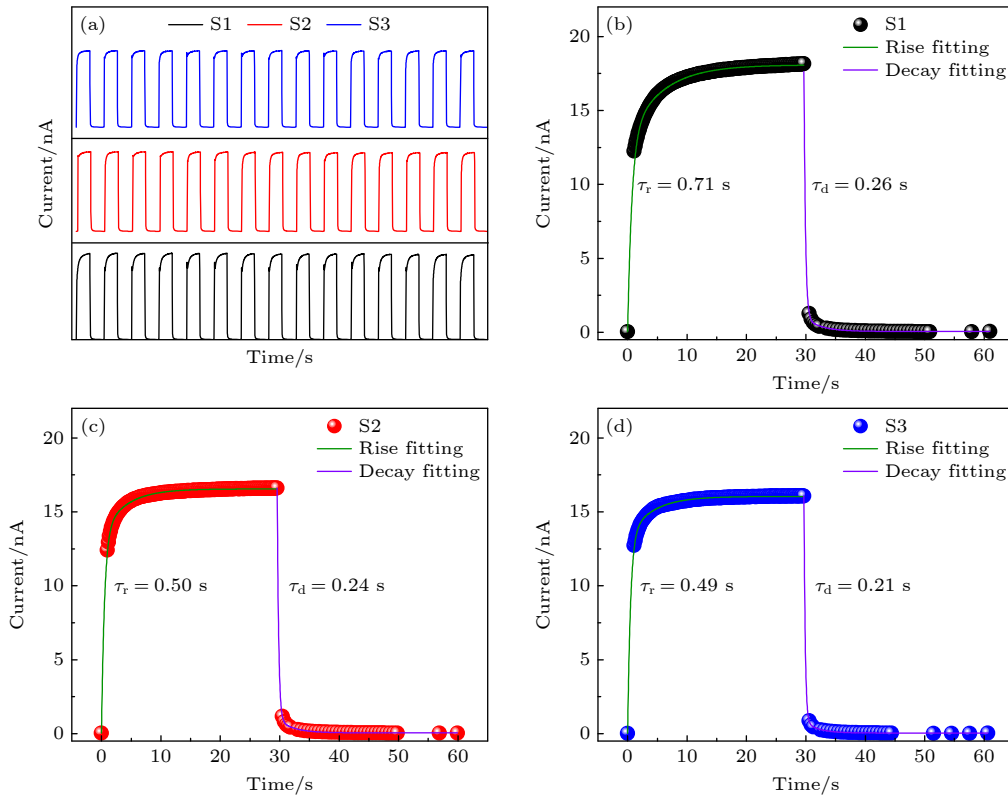


图 9 (a) 三种不同结构器件 S1, S2, S3 在 20 V 偏压下对 254 nm 紫外光的光响应 $I-t$ 特征曲线; (b) S1, (c) S2 和 (d) S3 器件上升及下降沿 $I-t$ 拟合曲线

Fig. 9. (a) Photoresponse of three different structural devices (S1, S2, and S3) under 254 nm light at a 20 V bias; Rise and decay $I-t$ fitting curves of (b) S1, (c) S2, and (d) S3 photodetectors.

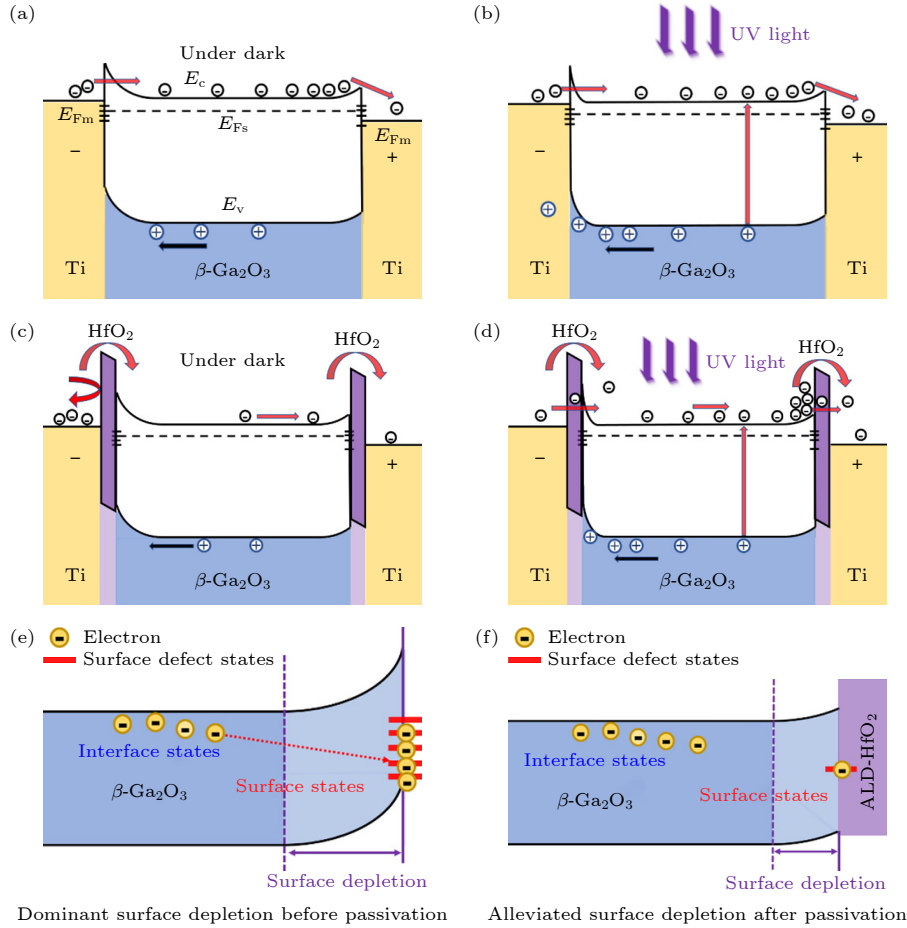


图 10 光电探测器在外加偏置电压下的能带结构及载流子转移过程 (a) 黑暗条件下的 MSM 结构探测器; (b) 254 nm 紫外光照下的 MSM 结构探测器; (c) 黑暗条件下的 MIS 结构探测器; (d) 254 nm 紫外光照下的 MIS 结构探测器. (e) 钝化前 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面状态示意图; (f) 钝化后 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面状态示意图

Fig. 10. Band structures and carriers transfer processes of photodetectors under applied bias voltage: (a) MSM photodetector in the dark; (b) MSM photodetector under 254 nm light; (c) MIS photodetector in the dark; (d) MIS photodetector under 254 nm light. The schematic diagrams in (e) and (f) show the surface states of a $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ film before and after passivation, respectively.

图如图 10(c) 和图 10(d) 所示, 在金属和 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜间引入 HfO_2 绝缘层后, 有效提高了金属 Ti 与 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 半导体之间的界面势垒, 在黑暗条件下, 高的势垒以及较宽的耗尽层, 限制了电子的运动, 来自负极和 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 内部的电子难以隧穿, 主要依靠热发射越过势垒, 暗电流有效降低. 当紫外光照射后, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 产生大量的电子-空穴对, 引起耗尽层内正电荷密度增加, 耗尽层宽度减小, 在外部偏置电压作用下, 从金属电极发射的电子部分可以通过隧穿的方式穿过 HfO_2 层, 同时 HfO_2 层插入到 Ga_2O_3 和 Ti/Au 接触界面后, 降低了器件内的缺陷浓度, Ga_2O_3 光电探测器中的俘获态引起载流子俘获/释放过程进而导致缓慢的响应过程, 使得器件内缺陷态浓度降低, 因而 MIS 型光电探测器拥有着更快的响应速度^[5].

与其他半导体材料一样, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的表面态影响着器件性能, 这是由于在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面发生了载流子复合过程. 图 10(e) 和图 10(f) 展示出 MIS 器件钝化前后 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的表面能级状态. 钝化前, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面存在的悬空键、位错和晶格畸变以及周围大气中吸附的氧气和水蒸气等一些带正、负电荷的外来杂质, 都可能成为复合中心. 来自半导体内部的载流子向表面复合中心迁移, 产生较大的表面耗尽区域, 引起表面电导率的变化, 产生一定的漏电流. 在这些通道表面上通过沉积 HfO_2 来钝化 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面, 可以减少表面复合中心, 减弱表面损耗效应^[19], 抑制表面漏电流的产生, 进一步降低器件暗电流, 同时, HfO_2 作为钝化层, 由于良好的紫外透过性并不影响 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜对于深紫外波段的光吸收.

4 结 论

本研究对基于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的传统 MSM 结构日盲紫外光电探测器进行了结构优化, 并对所制备的器件性能进行了深入对比探究. 在传统 MSM 型探测器的基础上, 将 HfO_2 这种高介电性的绝缘材料插入钛/金电极和 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 之间, 制备出 MIS 型的光电探测器, 显著降低了暗电流, 获得了更大光暗电流比、更高的比探测率和更快的响应速度. 此外, 在 MIS 型光电探测器的基础上, 探究了以 HfO_2 作为 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面钝化层的作用, 发现 HfO_2 作为钝化层可以有效地抑制 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜表面的漏电流, 从而进一步提高器件的探测性能. 本研究为制备高性能 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基的光电子器件提供了一种充满潜力的新途径.

参考文献

- [1] Chen X, Ren F, Gu S, Ye J 2019 *Photonics Res.* **7** 381
- [2] Kan H, Zheng W, Fu C, Lin R, Luo J, Huang F 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 6030
- [3] Guo D Y, Li P G, Chen Z W, Wu Z P, Tang W H 2019 *Acta 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]
- [4] Qian L X, Wu Z H, Zhang Y Y, Lai P T, Liu X Z, Li Y R 2017 *ACS Photonics* **4** 2203
- [5] Qin Y, Li L, Zhao X, Tompa G S, Dong H, Jian G, He Q, Tan P, Hou X, Zhang Z, Yu S, Sun H, Xu G, Miao X, Xue K, Long S, Liu M 2020 *ACS Photonics* **7** 812
- [6] Qin Y, Sun H, Long S, Tompa G S, Salagaj T, Dong H, He Q, Jian G, Liu Q, Lü H, Liu M 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 1475
- [7] Wang Y H, Tang Y Q, Li H R, Yang Z B, Zhang Q Y, He Z B, Huang X, Wei X H, Tang W H, Huang W, Wu Z P 2021 *ACS Photonics* **8** 2256
- [8] Hu D, Wang Y, Wang Y, Huan W, Dong X, Yin J 2022 *Mater. Lett.* **312** 131653
- [9] Liu S, Jiao S, Lu H, Nie Y, Gao S, Wang D, Wang J, Zhao L 2022 *J. Alloys Compd.* **890** 161827
- [10] Wang Y, Li H, Cao J, Shen J, Zhang Q, Yang Y, Dong Z, Zhou T, Zhang Y, Tang W, Wu Z 2021 *ACS Nano* **15** 16654
- [11] Hou X, Zhao X, Zhang Y, Zhang Z, Liu Y, Qin Y, Tan P, Chen C, Yu S, Ding M, Xu G, Hu Q, Long S 2022 *Adv. Mater.* **34** 2106923
- [12] Cui S, Mei Z, Zhang Y, Liang H, Du X 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1700454
- [13] Zhou H, Cong L, Ma J, Chen M, Song D, Wang H, Li P, Li B, Xu H, Liu Y 2020 *J. Alloys Compd.* **847** 156536
- [14] Han Z, Liang H, Huo W, Zhu X, Du X, Mei Z 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1901833
- [15] Chen C H 2013 *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 08JF08
- [16] Sheoran H, Kumar V, Singh R 2022 *ACS Appl. Electron. Mater.* **4** 2589
- [17] Arora K, Goel N, Kumar M, Kumar M 2018 *ACS Photonics* **5** 2391
- [18] Qian L X, Gu Z, Huang X, Liu H, Lü Y, Feng Z, Zhang W 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 40837
- [19] Ma J, Lee O, Yoo G 2019 *IEEE J. Electron Devices Society* **7** 512
- [20] Young S J, Ji L W, Chang S J, Liang S H, Lam K T, Fang T H, Chen K J, Du X L, Xue Q K 2008 *Sens. Actuators, A* **141** 225
- [21] Wang W J, Shan C X, Zhu H, Ma F Y, Shen D Z, Fan X W, Choy K L 2010 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **43** 045102
- [22] Seol J H, Lee G H, Hahn S H 2018 *IEEE Sens. J.* **18** 4477
- [23] Yin J, Liu L, Zang Y, Ying A, Hui W, Jiang S, Zhang C, Yang T, Chueh Y L, Li J, Kang J 2021 *Light:Sci. Appl.* **10** 113
- [24] Oshima T, Hashikawa M, Tomizawa S, Miki K, Oishi T, Sasaki K, Kuramata A 2018 *Appl. Phys. Exp.* **11** 112202
- [25] 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]
- [26] 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
- [27] Wang Y, Yang Z, Li H, Li S, Zhi Y, Yan Z, Huang X, Wei X, Tang W, Wu Z 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 47714
- [28] Dou L T, Yang Y (Micheal), You J B, Hong Z R, Chang W H, Li Ga, Yang Y 2014 *Nat. Commun.* **5** 5404
- [29] Lei T, Lü W M, Lü W X, Cui B Y, Hu R, Shi W H, Zeng Z M 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 027801 (in Chinese) [雷挺, 吕伟明, 吕文星, 崔博垚, 胡瑞, 时文华, 曾中明 2021 物理学报 **70** 027801]
- [30] Li X H, Zhang M, Yang J, Xing S, Gao Y, Li Y Z, Li S Y, Wang C J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 048501 (in Chinese) [李秀华, 张敏, 杨佳, 邢爽, 高悦, 李亚泽, 李思雨, 王崇杰 2022 物理学报 **71** 048501]
- [31] Zhou S R, Zhang H, Mo H L, Liu H W, Xiong Y Q, Li H L, Kong C Y, Ye L J, Li W J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 178503 (in Chinese) [周树仁, 张红, 莫慧兰, 刘浩文, 熊元强, 李泓霖, 孔春阳, 叶利娟, 李万俊 2021 物理学报 **70** 178503]

SPECIAL TOPIC—Novel physical properties of functional oxide thin films

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

Dong Dian-Meng Wang Cheng Zhang Qing-Yi Zhang Tao Yang Yong-Tao
Xia Han-Chi Wang Yue-Hui[†] Wu Zhen-Ping[‡]

(Laboratory of Information Functional Materials and Devices, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 20 November 2022; revised manuscript received 14 December 2022)

Abstract

Solar-blind photodetector (PD) converts 200–280 nm ultraviolet (UV) light into electrical signals, thereby expanding application range from security communication to missile or fire alarms detections. As an emerging ultra-wide bandgap semiconductor, gallium oxide (Ga₂O₃) has sprung to the forefront of solar blind detection activity due to its key attributes, including suitable optical bandgap, convenient growth procedure, highly temperature/chemical/radiation tolerance, and thus becoming a promising candidate to break the current bottleneck of photomultiplier tubes. The Ga₂O₃-based solar blind PDs based on various architectures have been realized in the past decade, including photoconductive PDs, Schottky barrier PDs, and avalanche PDs. Till now, the metal-semiconductor-metal (MSM) structure has been widely used in developing photoconductive Ga₂O₃ solar-blind PDs because of its simple preparation method and large light collection area. Unfortunately, despite unremitting efforts, the performance metric of reported MSM-type Ga₂O₃ solar-blind PDs still lags behind the benchmark of commercial PMTs. Apparently, lack of solution to the problem has greatly hindered further research and practical applications in this field. One effective strategy for further enhancing the device performance such as detectivity, external quantum efficiency (EQE), and light-to-dark ratio heavily relies on blocking the dark current. In this work, high-quality single crystalline β -Ga₂O₃ with a uniform thickness of 700 nm is grown by using a metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) technique. Then atomic layer deposition (ALD) fabricated ultrathin hafnium oxide (HfO₂) films (\sim 10 nm) are introduced as inserted insulators and passivation layers. The 30 nm/100 nm Ti/Au interdigital electrodes (length: 2800 μ m, width: 200 μ m, spacing: 200 μ m, 4 pairs) are fabricated by sputtering on the top of the film as the Ohmic contacts. Taking advantage of its novel dielectric and insulating properties, the leakage current on Ga₂O₃ thin film can be effectively inhibited by the inserted ultrathin HfO₂ layer, and thus further improving the performance of PDs. Compared with simple MSM structured Ga₂O₃ PD, the resulting metal-insulator-semiconductor (MIS) device significantly reduces dark current, and thus improving specific detectivity, enhancing light-to-dark current ratio, and increasing response speed. These findings advance a significant step toward the suppressing of dark current in MSM structured photoconductive PDs and provide great opportunities for developing high-performance weak UV signal sensing in the future.

Keywords: gallium oxide, ultraviolet detection, metal-insulator-semiconductor, surface passivation

PACS: 73.40.Qv, 73.40.Sx, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.72.20222222

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12074044) and the Open Fund of State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, China (Grant No. IPOC2021ZT05).

[†] Corresponding author. E-mail: yuehuiwang@bupt.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zhenpingwu@bupt.edu.cn

基于 HfO_2 插层的 Ga_2O_3 基金属-绝缘体-半导体结构日盲紫外光电探测器

董典萌 汪成 张清怡 张涛 杨永涛 夏翰驰 王月晖 吴真平

Ga_2O_3 -based metal-insulator-semiconductor solar-blind ultraviolet photodetector with HfO_2 inserting layer

Dong Dian-Meng Wang Cheng Zhang Qing-Yi Zhang Tao Yang Yong-Tao Xia Han-Chi Wang Yue-Hui Wu Zhen-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 097302 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222222

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222222>

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 - Ga_2O_3 及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展

Ultra-wide bandgap semiconductor of β - Ga_2O_3 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>

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

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

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

高分辨紫外电子轰击互补金属氧化物半导体器件的实验研究

High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection

物理学报. 2018, 67(1): 014209 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171729>

N掺杂对 β - Ga_2O_3 薄膜日盲紫外探测器性能的影响

Effect of N-doping on performance of β - Ga_2O_3 thin film solar-blind ultraviolet detector

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

基于机械剥离 β - Ga_2O_3 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 beta- Ga_2O_3 single crystal

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