

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

氧分压对a-Ga₂O₃基日盲紫外光电探测器性能的影响研究

杨瑞, 杨斯铄, 钱凌轩

引用本文:

杨瑞, 杨斯铄, 钱凌轩. 氧分压对a-Ga₂O₃基日盲紫外光电探测器性能的影响研究[J]. 光电工程, 2024, 51(6): 240116.

Yang R, Yang S S, Qian L X. Effect of oxygen partial pressure on amorphous Ga₂O₃-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(6): 240116.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240116>

收稿日期: 2024-05-20; 修改日期: 2024-06-04; 录用日期: 2024-06-04

相关论文

非晶氧化镓基日盲紫外探测器的研究进展

肖演, 杨斯铄, 程凌云, 周游, 钱凌轩

光电工程 2023, 50(6): 230005 doi: 10.12086/oe.2023.230005

Sn掺杂对Ga₂O₃基日盲紫外探测器性能的影响研究

侯爽, 刘庆, 邢志阳, 钱凌轩, 刘兴钊

光电工程 2019, 46(10): 190011 doi: 10.12086/oe.2019.190011

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240116

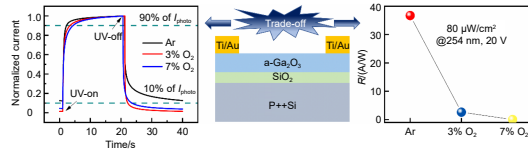
氧分压对 a-Ga₂O₃ 基日盲紫外光电探测器性能的影响研究

杨 瑞¹, 杨斯铄¹, 钱凌轩^{1,2*}¹电子科技大学电子薄膜与集成器件全国重点实验室,

四川 成都 611731;

²电子科技大学重庆微电子产业技术研究院, 重庆 401332

摘要: 非晶氧化镓 (a-Ga₂O₃) 基日盲紫外光电探测器的性能与 a-Ga₂O₃ 薄膜内的氧空位有关, 氧空位的浓度制约着探测器的响应度和响应速度。为了在探测器的响应度和响应速度之间达到平衡, 本文通过微调射频磁控溅射过程中的氧分压, 调控薄膜内的氧空位浓度, 并在此基础上成功制备金属-半导体-金属 (metal-semiconductor-metal, MSM) 型日盲紫外探测器。研究结果显示, 通过掺入氧气能减少薄膜内的氧空位, 改善薄膜的致密度。适当条件的氧分压可以使探测器在维持良好响应度的前提下, 同时拥有较快的响应速度, 在两种互相制约的特性上达到了平衡。特别地, 在 3% 氧分压条件下制备得到的日盲探测器在 254 nm、80 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外光照射下具有 2.6 A/W 的响应度以及 2.2 s/0.96 s 的快速响应速度。

关键词: 非晶氧化镓; 日盲紫外光电探测器; 响应度; 射频磁控溅射**中图分类号:** TN23**文献标志码:** A杨瑞, 杨斯铄, 钱凌轩. 氧分压对 a-Ga₂O₃ 基日盲紫外光电探测器性能的影响研究 [J]. 光电工程, 2024, 51(6): 240116Yang R, Yang S S, Qian L X. Effect of oxygen partial pressure on amorphous Ga₂O₃-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(6): 240116

Effect of oxygen partial pressure on amorphous Ga₂O₃-based solar-blind ultraviolet photodetectors

Yang Rui¹, Yang Sishuo¹, Qian Lingxuan^{1,2*}¹State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;²Chongqing Institute of Microelectronics Industry Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chongqing 401332, China

Abstract: Oxygen vacancies in the a-Ga₂O₃ film play a crucial role in the performance of a-Ga₂O₃-based solar-blind photodetectors (SBPDs). The concentration of oxygen vacancies is a “double-edged sword”, increasing the

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-06-04; 录用日期: 2024-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62174025)

*通信作者: 钱凌轩, lxqian@uestc.edu.cn

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

responsivity of the SBPDs but deteriorating the response speed. In order to achieve a balance between these two key parameters, we adjusted the oxygen vacancy concentration in the film by delicately tuning the oxygen partial pressure during the sputtering process. The metal-semiconductor-metal (MSM) SBPDs were prepared accordingly. The results demonstrate that incorporating moderate oxygen can reduce the oxygen vacancies in the film and improve the density of the film. Under appropriate conditions, the oxygen partial pressure enables the photodetector to maintain good responsivity while having a fast response speed. At an oxygen partial pressure of 3%, the device has a high responsivity of 2.62 A/W under 254-nm DUV irradiation and a fast response speed of 2.2 s/0.96 s.

Keywords: a-Ga₂O₃; solar-blind photodetector; responsivity; radio frequency magnetron sputtering

1 引言

光谱中 280 nm~200 nm 波段的紫外光会被地球表面大气层中的臭氧强烈吸收, 从而地表接收的太阳辐射几乎不含该波段的光, 因此习惯上将该波段的紫外光称为日盲区紫外光^[1-2]。由于地球的光背景中几乎没有日盲区紫外光, 因此日盲紫外探测技术具有极低的背景噪声和超高的信噪比。一般来说, 日盲区紫外光常见于臭氧层空洞、短路产生的电晕、隐形轰炸机和导弹的尾焰中, 这些独特优势使得日盲紫外探测器在臭氧空洞监测、电晕检测、导弹预警等诸多领域都有极其重要的应用^[3-5]。

目前用来实现日盲探测的候选材料有 MgZnO^[6]、AlGaN^[7]、金刚石^[8]、Ga₂O₃^[8-9] 等。由于 Ga₂O₃ 超宽的禁带宽度 (~4.9 eV) 使得其吸收峰刚好处在日盲紫外波段, 这使得它几乎不需要掺杂就能响应处在日盲波段的光, Ga₂O₃ 被认为是日盲紫外光电探测器的最热门的候选材料之一。Ga₂O₃ 具有五种晶相 (α 、 β 、 γ 、 δ 、 ϵ), 其中 β 相是最稳定的, 同时也是在日盲光电探测器中被研究得最多的晶相^[3]。根据之前的文献报道, β -Ga₂O₃ 日盲探测器展现出了不俗的光电性能, 如 2018 年 Arora 等^[10] 报道, 他们在硅衬底上使用高温种子层生长 β -Ga₂O₃ 薄膜并成功构建日盲紫外光电探测器, 器件在极其微弱的紫外光信号 (44 nW/cm²) 下依然具有 96.13 A/W 的响应度和 4.76×10^4 的外量子效率。2019 年, Wang 等^[11] 通过磁控溅射和后沉积退火工艺制备了高质量的 β -Ga₂O₃ 薄膜。在此基础上成功制备了 MSM 型光电探测器, 器件具有大于 10³ 的光暗电流比同时也有 0.31 s/0.05 s 的快速响应时间。但是, 制备高质量的 β -Ga₂O₃ 薄膜往往伴随着高温 (>600 °C) 退火处理, 这无疑会提高制备的成本和工艺的复杂性。

近来, a-Ga₂O₃ 薄膜以其低温制备特性受到研究

人员的广泛关注。由于其无需考虑晶格失配, 使得衬底的选择更加灵活。同时, 大面积成膜时仍能保持出色的均匀性, 满足高性能需求。根据文章报道, 基于 a-Ga₂O₃ 的光电探测器也可以得到能和 β -Ga₂O₃ 光电探测器相比拟的性能^[12-13]。目前, 制备 a-Ga₂O₃ 薄膜的方式主要为射频磁控溅射^[14](RFMS)、原子层沉积^[15](ALD)、化学气相沉积^[16](CVD) 等。射频磁控溅射作为其中应用最为广泛的方式, 具有薄膜沉积速度快、工艺过程方便易操作、成本比较低等优势^[17]。虽然, 射频磁控溅射制备的 a-Ga₂O₃ 日盲光电探测器现在具有很高的的响应度, 但是较高的响应度往往伴随着较慢的响应速度。原因在于磁控溅射沉积的 a-Ga₂O₃ 薄膜中存在大量的氧空位缺陷, 这部分缺陷会束缚住空穴。氧空位浓度越高, 被束缚住的空穴就越多, 紫外光照射时产生的光电导增益提升使得探测器响应度上升。但是另一方面, 氧空位导致被束缚住的空穴难以复合, 给器件带来严重的持续光电导 (persistent photoconductivity, PPC) 效应, 影响探测器的响应速度^[18]。

本文尝试优化磁控溅射时的氧分压来调控薄膜中的氧空位浓度, 并以此为基础成功制备了 MSM 型光电探测器, 研究不同氧分压对日盲紫外光电探测器性能的影响。结果显示, 氧分压可以有效地调控 a-Ga₂O₃ 薄膜中的氧空位, 优化后的氧分压可以让探测器在响应度和响应速度两者之间取得平衡。

2 实验内容

采用射频磁控溅射在面积为 1 cm×1 cm 的硅片衬底 (包含热氧化法生长的 50 nm SiO₂) 上制备 a-Ga₂O₃ 薄膜作为光吸收层。Ga₂O₃ 陶瓷靶材纯度为 99.999%。硅片依次在丙酮、乙醇和去离子水中超声清洗 15 min, 最后用氮气吹干。在薄膜沉积之前, 将腔室真空度抽到 5×10^{-5} Pa。溅射功率为 80 W, 保持溅射总时间

为 40 min。溅射过程中的气氛为氩气 (Ar) 和氧气 (O_2) 混合气体。所有样品溅射过程中, 气流总量均保持在 30 sccm。生长条件的唯一差异是氧分压分别为 0%、3%、7%。在 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜开始沉积前进行了足够时间的预溅射以去除靶材表面污染。采用传统的紫外光刻和剥离工艺, 构建了具备叉指电极的 MSM 型 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 日盲探测器。硅片衬底上的光电探测器具有 25 对叉指, 叉指宽度为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 间距为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 长度为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 。器件的结构示意图以及叉指电极在显微镜下的实物图如图 1 所示。电极采用 Ti/Au 电极, 通过电子束蒸发沉积 10 nm Ti 作为薄膜与 Au 之间的粘连层, 接着再沉积 50 nm Au。所有的器件在电极经过剥离工艺后放入炉管中进行电极退火, 以此改善电极与薄膜之间的接触。器件的退火气氛为氮气, 退火温度和时间分别为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 、10 min。



图 1 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MSM 型日盲紫外探测器结构示意图 (左) 及其显微镜下实物图 (右)
Fig. 1 The schematic diagram of the $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MSM SBPD (left) and its microscopic image (right)

射频磁控溅射制备的 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的表征方式和相关器件的性能测试方式如下: 测量薄膜厚度使用的是型号为 SE 850Z 的椭圆偏振光谱仪, 测量时采用的薄膜模型为柯西模型, 分辨率优于 1 nm ; 薄膜化学性质及组成通过 X 射线光电子能谱 (XPS) 进行检测, 设备来自赛默飞世尔科技的 ESCALAB XI+; 薄膜的晶体结构通过入射角度为 0.1° 的 Rigaku 台式掠入射

X 射线衍射仪来分析; 测试薄膜的透射吸收光谱采用的是 Shimadzu 的紫外可见近红外分光光度计, 型号为 UV-3600, 测试波段为 $200\text{ nm}\sim 800\text{ nm}$; 电学测试使用的是 Lake Shore 的 PS-100 型桌面探针平台和盖伦电子的 FS-380 型半导体参数分析仪; 通过宽谱白光光源输入到卓立汉光 Omni- λ 3047i 型光栅光谱仪得到 254 nm 的紫外光源, 光源的功率密度为 $80\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

3 实验结果

椭圆偏振光谱仪的测试结果显示, 在 0%、3%、7% 三个不同氧分压条件下, 溅射所制备的薄膜厚度分别为 70.5 nm 、 67.6 nm 和 33.1 nm 。随着氧分压的增加, 薄膜的厚度呈现出逐步减小的趋势。这种减少很可能是由于氧气的引入促进了薄膜致密性的增强, 进而减少了潜在的陷阱和缺陷。然而, 当氧分压过高时, 沉积速率会显著降低, 导致薄膜厚度减小。太薄的薄膜表面存在的表面态可能会对 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电探测器的性能产生不利影响^[12]。图 2(a) 展示了在纯氩条件下制备的 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜和硅片衬底的 GIXRD 测试结果, 图 2(b) 是纯氩条件下薄膜的 XPS 全谱结果。从图 2(a) 中不难看出, 两个样品大约在 51.3° 的位置呈现出一个明显的主峰, 该峰很可能对应于衬底表面二氧化硅 (400) 晶面的特征峰 (PDF#99-0038)。值得注意的是, 图 2(a) 中并未发现任何氧化镓的结晶峰位, 这刚好证实了所制备的氧化镓薄膜呈现为非晶态结构。非晶结构的形成归因于溅射原子在温度较低时没有足够的能量进行迁移^[19]。对图 2(b) 使用 advantage 软件进行全谱扫描寻峰, 未发现 Ga、O、C 之外的元素, 证明非晶氧化镓薄膜内不存在明显的杂质污染。

图 3 是三个不同条件下测试得到的 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的透射吸收光谱。从图 3 可知, 纯氩和 3% 氧分压条

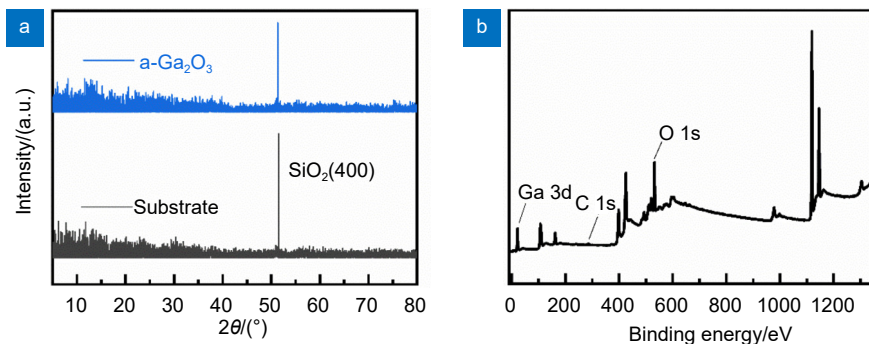


图 2 (a) 纯氩条件下 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜和衬底硅片的 GIXRD $\theta\sim 2\theta$ 扫描图谱; (b) 纯氩条件下 $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的 XPS 全谱
Fig. 2 (a) GIXRD spectra of the substrate and $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ film deposited at pure Ar; (b) XPS survey of $a\text{-Ga}_2\text{O}_3$ film deposited at pure Ar

件下的 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜在日盲波段表现出较低的透射率, 而 7% 氧分压条件下的薄膜在日盲波段却显示出较高的透射率。这可能与薄膜的厚度有关, 太薄的薄膜使得入射光的吸收有限。同时厚度较小的薄膜可能相较于厚度更大的薄膜表面形貌更加粗糙, 从而具有更多的表面态。

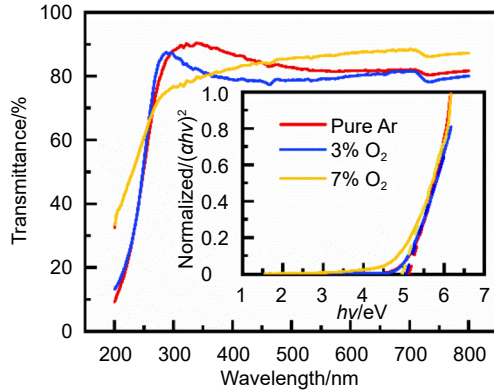


图3 不同氧分压下 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的透射吸收光谱以及 $(\alpha hv)^2-hv$ 曲线 (插图)

Fig. 3 Optical transmittance spectra of $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ films deposited at different oxygen partial pressures and $(\alpha hv)^2-hv$ plots (inset)

为了对薄膜带隙进行拟合, 先通过的比尔朗伯定律将透射率转换为吸收系数, 如下所示^[20]:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln(T), \quad (1)$$

其中: T 是薄膜的透射率, α 是吸收系数, d 是薄膜的厚度。吸收系数与入射光子能量和材料光学带隙之间的关系由下式^[21]给出

$$(\alpha hv) = B(hv - E_g)^n, \quad (2)$$

其中: B 是一个常数, hv 是入射光子能量, n 对于氧化镓这样的直接带隙半导体来说可取 1/2。通过绘制 $(\alpha hv)^2-hv$ 曲线来得到薄膜的带隙, 该曲线线性区的斜率与 hv 轴相交的截距为薄膜的带隙。从图3中的插图可以看到, 纯氩、3% 氧分压、7% 氧分压三个条件下的薄膜带隙拟合结果分别为 5.13 eV、5.06 eV、4.96 eV, 这些结果与之前的文献报道的 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 带隙十分接近^[22-24]。通常来说, 文献中报道的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 带隙一般在 4.8 eV 附近^[25-27], 这与拟合得到的 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 带隙有一定差距。随着氧分压的提高, $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的带隙有逐渐减小的趋势, 并且更加接近 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的带隙宽度, 这说明随着氧气的补充, 薄膜中的氧空位被进一步填充, 原子排列向晶态靠近, 这可以在后续的 XPS 结果中得到佐证。

对制备的 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜进行了 XPS 测试, 得到

的 O 1s 结果如图4(a)所示。对每个样品来说, 样品中的 O 1s 峰可以通过高斯拟合分解成三个部分, 分别为: 1) O_I 峰: 约 530.6 eV, 该峰来自于晶格氧原子 O^{2-} ; 2) O_{II} 峰: 约 531.2 eV, 此峰来自于氧缺陷区域, 与 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 氧空位中的 O^{2+} 有关; 3) O_{III} 峰: 约 532.1 eV, 来自于表面污染物中的 C-O 键或氢氧化物的键^[13,28]。每个峰的面积与相应组分的强度成正比。因此 $O_{II}/(O_I + O_{II})$ 的强度比值可以反映薄膜中氧空位的浓度大小。由图4(b-d)拟合得出的结果显示, 纯氩、3% 氧分压和 7% 氧分压三个条件下的氧空位浓度分别为 53.19%、45.65%、37.50%。可见, 氧分压的提高有效减少了磁控溅射薄膜过程中氧空位的形成。

图5是不同氧分压下 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MSM 型探测器的电流电压特性曲线。图5(a)显示, 在三个氧分压条件下探测器的暗电流并无明显区别, 整体电流维持在较低水平。纯氩、3% 氧分压、7% 氧分压三个条件下的暗电流在 20 V 电压下分别为 4.0 pA、2.6 pA、5.9 pA。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜内本征载流子主要来源于氧空位, 随着氧分压提高, 薄膜内氧空位浓度下降, 薄膜的本征载流子数量减少。因此, 探测器的暗电流应该随着氧分压增大而减小, 而 7% 氧分压条件下的暗电流有所上升, 这可能与该条件下薄膜的厚度太小导致的表面态相关。紫外光照射后, $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜中的大量电子吸收光子能量后跃升至导带, 薄膜中载流子数量提高使得薄膜的导电性增强。如图5(b)所示, 纯氩、3% 氧分压、7% 氧分压对应的 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 日盲紫外光电探测器在 20 V 电压下的光电流分别为 4.3 μA 、0.3 μA 、3.2 nA。随着氧分压的提高, 光电流逐渐减小, 这是因为氧空位浓度的下降导致器件的光电导增益下降。

响应度是评估探测器光电转换效率的一个重要性能参数, 它反映了探测器将光信号转换为电信号的能力, 是衡量探测器的关键指标。响应度通过如下公式计算:

$$R = \frac{I_{\text{photo}}}{PS}, \quad (3)$$

其中: P 是入射紫外线的光功率密度, S 是器件的有效受光面积。在本次实验中使用的紫外光源在 254 nm 波长下的光功率密度为 80 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$; 经计算得到的器件的有效受光面积为 $1.47 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 。在外加 20 V 电压时, 纯氩、3% 氧分压和 7% 氧分压三个条件下器件的响应度 (图5(a)插图) 分别为 36.6 A/W、

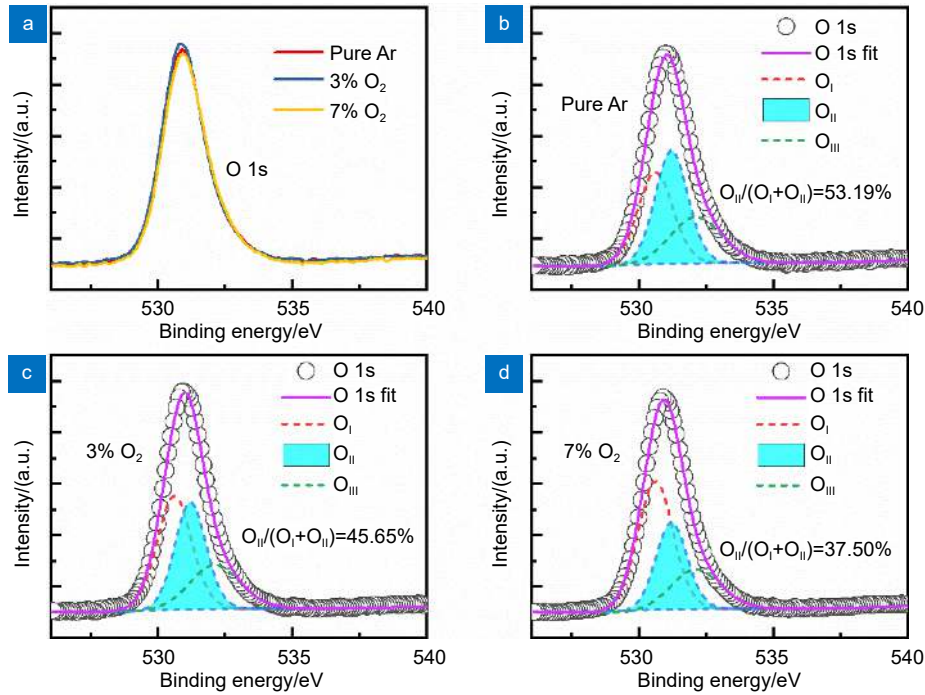


图 4 不同氧分压条件下 a-Ga₂O₃ 薄膜的 XPS O 1s 峰位及拟合分峰结果。(a) 不同氧分压下 a-Ga₂O₃ 薄膜的 XPS O 1s 峰位; (b) 纯氩; (c) 3% 氧分压; (d) 7% 氧分压条件下 O 1s 拟合分峰结果

Fig. 4 XPS O 1s core level and fitting results of a-Ga₂O₃ films under different oxygen partial pressures. (a) O 1s core level of a-Ga₂O₃ films with different oxygen partial pressures; Fitting results of O 1s core level of (b) pure Ar, (c) 3% oxygen partial pressure, and (d) 7% oxygen partial pressure

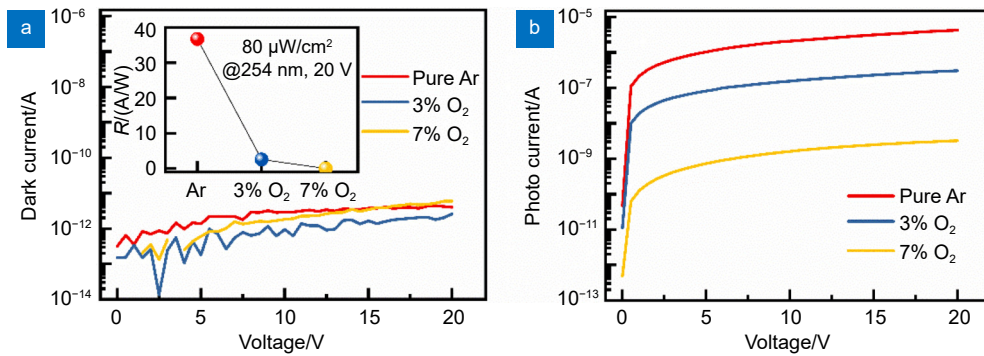


图 5 不同氧分压下 a-Ga₂O₃ MSM 型探测器的电流-电压特性曲线。(a) 无紫外线光照下的电流电压曲线以及三个条件下的响应度(插图); (b) 254 nm、80 μW/cm² 紫外光照下的电流电压曲线

Fig. 5 The current-voltage(I-V) of the a-Ga₂O₃ MSM SBPDs under different oxygen partial pressures. (a) The dark current characteristics and the responsivity under three conditions(inset); (b) The photocurrent characteristics(254 nm, 80 μW/cm²)

2.6 A/W、27.2 mA/W。随着氧分压的上升, 器件的响应度迅速下降, 在 7% 氧分压条件下器件的响应度出现三个数量级的下滑。由于氧分压的提高, a-Ga₂O₃ 薄膜中的氧空位被大量填补, 导致 7% 氧分压条件下的 a-Ga₂O₃ 薄膜内部的光电导增益不如其他两个条件, 从而导致器件的响应度下降。虽然纯氩条件下的器件具有较高的响应度, 但是从前文中的分析结果来看, 该条件下的氧空位也较多, 需要结合器件的响应速度

综合比较。

不同氧分压条件下 a-Ga₂O₃ MSM 型探测器的瞬态响应特性如图 6 所示。紫外光源的一个开关周期为 40 s, 开启时间为 20 s。图 6(a) 是三个条件下器件的多周期的瞬态响应曲线。每个条件下的器件在多周期测试中均保持了良好的重复性和可靠性。探测器的响应时间由两个部分组成: 上升时间和下降时间。上升时间为光照开始时器件光电流由峰值的 10% 上升

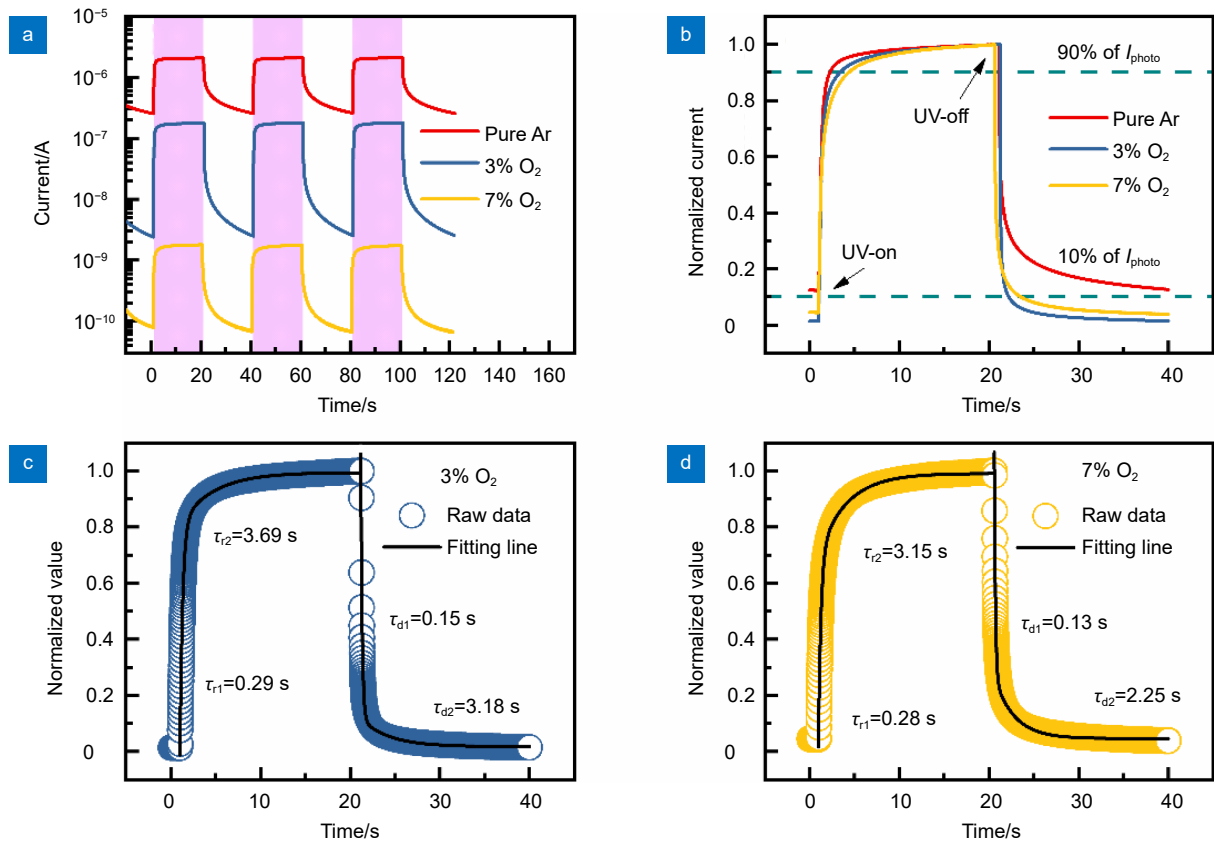


图 6 不同氧分压条件下 a-Ga₂O₃ MSM 型探测器的瞬态响应。(a) 探测器多周期瞬态响应；(b) 探测器单周期归一化瞬态响应；(c) 3% 氧分压器件上升和下降过程的实验数据和拟合曲线；(d) 7% 氧分压器件上升和下降过程的实验数据和拟合曲线

Fig. 6 Transient responses of a-Ga₂O₃ MSM SBPDs under different oxygen partial pressures. (a) Transient response for multicycles; (b) Normalized transient response; Experimental and fitted curves of the rise and decay processes for the device with (c) 3% oxygen partial pressure and (d) 7% oxygen partial pressure

到 90% 所需要的时间，下降时间为光照结束后器件光电流由峰值的 90% 下降至 10% 所需要的时间^[3,29-30]。由图 6(b) 可知，纯氩条件下的器件在关闭紫外光照射后，光电流不能衰减至光电流峰值的 10%，3% 氧分压和 7% 氧分压条件下的器件其上升时间/下降时间分别为 2.2 s/0.96 s 和 1.3 s/0.94 s。通过对比可知，在磁控溅射时氧气的加入可以有效提升探测器的响应速度。

器件的瞬态响应曲线可以通过如下方程^[31]来拟合：

$$I = I_0 + A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (4)$$

其中： I_0 是有紫外光照射和无紫外光照射时器件的稳定电流值， A_1 和 A_2 是常数， t 为时间，在对瞬态响应的上升阶段做拟合时， τ_1 和 τ_2 分别是快速上升时间和慢速上升时间，而在下降阶段分别为快速下降时间和慢速下降时间。图 6(c, d) 分别是 3% 氧分压和 7% 氧

分压条件下器件瞬态响应的拟合结果。慢速响应时间与薄膜的缺陷相关，当氧分压升高时，薄膜内部的氧空位相应地减少，7% 氧分压对应的器件慢速响应时间更小。

4 结 论

本文研究了射频磁控溅射过程中氧分压对于 a-Ga₂O₃ 薄膜的影响，在此基础上制备了 a-Ga₂O₃ 日盲光电探测器。通过微调氧分压可以改变沉积的 a-Ga₂O₃ 薄膜内氧空位的含量。氧空位一方面可以通过引入内部缺陷，增大器件的内部增益来提高探测器的响应度，另一方面与氧空位相关的 PPC 效应会导致器件响应速度的衰退。通过精细调节的氧分压可以使薄膜内的氧空位含量在这两者之间取得很好的平衡。纯氩条件下的光电探测器虽然具有最高的响应度，但相应的响应速度很慢。7% 氧分压条件下的光电探测器具有较快的响应速度，但是响应度和其他两者相比

低了三个数量级。3% 氧分压的条件制备的器件可以在拥有较高的响应度的同时具有和 7% 条件下差不多的响应速度。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Xu J J, Zheng W, Huang F. Gallium oxide solar-blind ultraviolet photodetectors: a review[J]. *J Mater Chem C*, 2019, 7(29): 8753–8770.
- [2] Xiao Y, Yang S S, Cheng L Y, et al. Research progress of solar-blind UV photodetectors based on amorphous gallium oxide[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(6): 230005.
肖演, 杨斯钰, 程凌云, 等. 非晶氧化镓基日盲紫外探测器的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, 50(6): 230005.
- [3] Qin Y, Long S B, Dong H, et al. Review of deep ultraviolet photodetector based on gallium oxide[J]. *Chin Phys B*, 2019, 28(1): 018501.
- [4] Xu Y, Cheng Y L, Li Z, et al. High performance gate tunable solar blind ultraviolet phototransistors based on amorphous Ga₂O₃ films grown by mist chemical vapor deposition[J]. *Nano Select*, 2021, 2(11): 2112–2120.
- [5] Wang Z, Zheng W, Hu Q C, et al. Pt/(InGa)₂O₃/n-Si heterojunction-based solar-blind ultraviolet photovoltaic detectors with an ideal absorption cutoff edge of 280 nm[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(37): 44568–44576.
- [6] Chen X, Liu K W, Wang X, et al. Performance enhancement of a ZnMgO film UV photodetector by HF solution treatment[J]. *J Mater Chem C*, 2017, 5(40): 10645–10651.
- [7] Varshney U, Aggarwal N, Gupta G. Current advances in solar-blind photodetection technology: using Ga₂O₃ and AlGaIn[J]. *J Mater Chem C*, 2022, 10(5): 1573–1593.
- [8] Lu Y J, Lin C N, Shan C X. Optoelectronic diamond: growth, properties, and photodetection applications[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, 6(20): 1800359.
- [9] Chen M N, Zhang Z P, Wen B, et al. Low dark current and high stability X-ray detector based on FAPbI₃/Ga₂O₃ heterojunction[J]. *J Alloys Compd*, 2023, 941: 168989.
- [10] Arora K, Goel N, Kumar M, et al. Ultrahigh performance of self-powered β-Ga₂O₃ thin film solar-blind photodetector grown on cost-effective Si substrate using high-temperature seed layer[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(6): 2391–2401.
- [11] Wang J, Ye L J, Wang X, et al. High transmittance β-Ga₂O₃ thin films deposited by magnetron sputtering and post-annealing for solar-blind ultraviolet photodetector[J]. *J Alloys Compd*, 2019, 803: 9–15.
- [12] Lee S H, Kim S B, Moon Y J, et al. High-responsivity deep-ultraviolet-selective photodetectors using ultrathin gallium oxide films[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(11): 2937–2943.
- [13] Qian L X, Wu Z H, Zhang Y Y, et al. Ultrahigh-responsivity, rapid-recovery, solar-blind photodetector based on highly nonstoichiometric amorphous gallium oxide[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(9): 2203–2211.
- [14] Wang C, Fan W H, Zhang Y C, et al. Effect of oxygen flow ratio on the performance of RF magnetron sputtered Sn-doped Ga₂O₃ films and ultraviolet photodetector[J]. *Ceram Int*, 2023, 49(7): 10634–10644.
- [15] Yang Y, Liu W M, Huang T T, et al. Low deposition temperature amorphous ALD-Ga₂O₃ thin films and decoration with MoS₂ multilayers toward flexible solar-blind photodetectors[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(35): 41802–41809.
- [16] Kobayashi E, Boccard M, Jeangros Q, et al. Amorphous gallium oxide grown by low-temperature PECVD[J]. *J Vac Sci Technol*, 2018, 36(2): 021518.
- [17] Saikumar A K, Nehate S D, Sundaram K B. Review—RF sputtered films of Ga₂O₃[J]. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2019, 8(7): Q3064–Q3078.
- [18] Chen Y H, Han S, Yue D W, et al. UV response characteristics of amorphous Ga₂O₃ thin films with different microatom distributions and a low-temperature fabricated ultrahigh-performance α-Ga₂O₃ UV detector[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(3): 985–999.
- [19] Kumar S S, Rubio E J, Noor-A-alam M, et al. Structure, morphology, and optical properties of amorphous and nanocrystalline gallium oxide thin films[J]. *J Phys Chem C*, 2013, 117(8): 4194–4200.
- [20] Ramana C V, Rubio E J, Barraza C D, et al. Chemical bonding, optical constants, and electrical resistivity of sputter-deposited gallium oxide thin films[J]. *J Appl Phys*, 2014, 115(4): 043508.
- [21] Liao Y K, Jiao S J, Li S F, et al. Effect of deposition pressure on the structural and optical properties of Ga₂O₃ films obtained by thermal post-crystallization[J]. *CrystEngComm*, 2018, 20(1): 133–139.
- [22] Wang Y H, Li H R, Cao J, et al. Ultrahigh gain solar blind avalanche photodetector using an amorphous Ga₂O₃-based heterojunction[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(10): 16654–16663.
- [23] Wang Y F, Lin Z H, Ma J L, et al. Multifunctional solar-blind ultraviolet photodetectors based on p-PCDTBT/n-Ga₂O₃ heterojunction with high photoresponse[J]. *InfoMat*, 2024, 6(2): e12503.
- [24] Liu Y M, Qin H Y, Peng C, et al. Boosting the responsivity of amorphous-Ga₂O₃ solar-blind photodetector via organosilicon surface passivation[J]. *Appl Phys Lett*, 2024, 124(8): 082102.
- [25] Li Z, Feng Z Q, Xu Y, et al. High performance β-Ga₂O₃ solar-blind metal–oxide–semiconductor field-effect phototransistor with hafnium oxide gate dielectric process[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2021, 42(4): 545–548.
- [26] Zhi Y S, Liu Z, Zhang S H, et al. 16 × 4 linear solar-blind UV photoconductive detector array based on β-Ga₂O₃ film[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2021, 68(7): 3435–3438.
- [27] Li X X, Zeng G, Li Y C, et al. High responsivity and flexible deep-UV phototransistor based on Ta-doped β-Ga₂O₃[J]. *npj Flex Electron*, 2022, 6(1): 47.
- [28] Cui S J, Mei Z X, Zhang Y H, et al. Room-temperature fabricated amorphous Ga₂O₃ high-response-speed solar-blind photodetector on rigid and flexible substrates[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, 5(19): 1700454.
- [29] Shi X L, Liu H Y, Hou S, et al. The applications of surface plasmons in Ga₂O₃ ultraviolet photodetector[J]. *Opto-Electron*

Eng, 2018, **45**(2): 170728.

石雄林, 刘宏宇, 侯爽, 等. 表面等离子体在氧化镓基紫外探测器中的应用[J]. *光电工程*, 2018, **45**(2): 170728.

- [30] Hou S, Liu Q, Xing Z Y, et al. Effects of Sn doping on Ga₂O₃-based solar blind photodetectors[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(10): 190011.

侯爽, 刘庆, 邢志阳, 等. Sn 掺杂对 Ga₂O₃ 基日盲紫外探测器性能的影响研究[J]. *光电工程*, 2019, **46**(10): 190011.

- [31] Liu N S, Fang G J, Zeng W, et al. Direct growth of lateral ZnO nanorod UV photodetectors with schottky contact by a single-step hydrothermal reaction[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2010, **2**(7): 1973–1979.

作者简介



杨瑞 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事宽禁带半导体材料与器件的研究。

E-mail: 202221020621@std.uestc.edu.cn



【通信作者】钱凌轩 (1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事半导体器件研究。

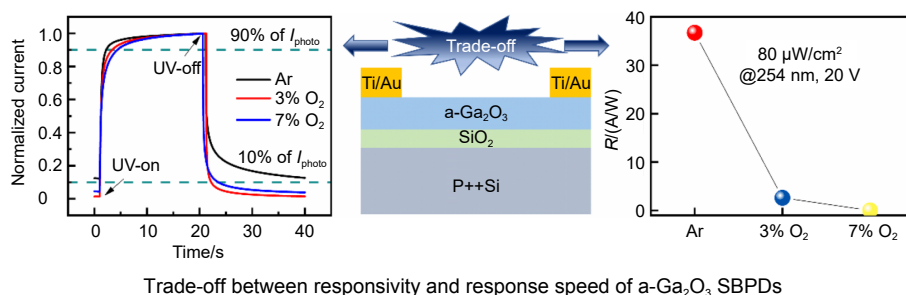
E-mail: lxqian@uestc.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Effect of oxygen partial pressure on amorphous Ga₂O₃-based solar-blind ultraviolet photodetectors

Yang Rui¹, Yang Sishuo¹, Qian Lingxuan^{1,2*}



Overview: Solar-blind photodetectors(SBPDs) exhibit advantages such as high sensitivity, high communication accuracy, and high signal-to-noise ratio, making them highly desirable for applications in ozone hole monitoring, corona detection, missile warning, and other military and civil fields. Among the materials utilized for SBPDs, Ga₂O₃ is particularly attractive due to its bandgap that inherently corresponds to a solar-blind spectrum without any alloy and dopant. Generally, crystalline Ga₂O₃ exists in various polymorphs, including α , β , γ , ϵ , and δ . Among these, β -Ga₂O₃ possesses the most stable structure. Therefore, β -Ga₂O₃ in the form of thin films, nano-structures, and single crystals has been widely explored for detection applications. In 2018, Kanika et al. reported the growth of β -Ga₂O₃ thin films on silicon substrates using a high-temperature seed layer and successfully constructed a solar-blind UV photodetector. The device demonstrated excellent performance under extremely weak ultraviolet signals (44 nW/cm²) with a responsivity of 96.13 AW⁻¹ and an external quantum efficiency of 4.76×10⁴. In 2019, Wang et al. prepared a high-quality β -Ga₂O₃ film on a sapphire substrate via magnetron sputtering followed by post-deposition annealing. Furthermore, a metal-semiconductor-metal(MSM) structure photodetector was successfully prepared. This device exhibited a photo-to-dark current ratio greater than 10³, a response time of 0.31 s, and a decay time of 0.05 s. However, the high-temperature growth conditions required for β -Ga₂O₃ can increase the cost and complexity of the process, potentially hindering its widespread applications.

The amorphous Ga₂O₃ (a-Ga₂O₃), with its uniform structure, is getting popular among researchers worldwide, as it is fabricated through a simple process at low temperatures. As previously reported, a-Ga₂O₃-based photodetectors can obtain performance comparable to that of β -Ga₂O₃ photodetectors. Currently, radio frequency(RF) magnetron sputtering has been widely applied to prepare a-Ga₂O₃ thin films, which has the advantages of a fast growth rate, simplicity of operation, and low cost. However, despite the high responsivity of a-Ga₂O₃ solar-blind photodetectors prepared by RF magnetron sputtering, this high responsivity is often accompanied by a slow response speed. The reason for this is the presence of a large number of oxygen vacancies in the a-Ga₂O₃ films deposited via magnetron sputtering. In this paper, we optimized the oxygen partial pressure during magnetron sputtering to control the concentration of oxygen vacancies in the film. We prepared MSM photodetectors to investigate the effect of different oxygen partial pressures on the performance of the solar-blind photodetectors. The results demonstrate that the oxygen partial pressure can effectively regulate the oxygen vacancies in a-Ga₂O₃ thin films, and an optimized oxygen partial pressure allows the photodetector to achieve a balance between responsivity and response speed.

Yang R, Yang S S, Qian L X. Effect of oxygen partial pressure on amorphous Ga₂O₃-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(6): 240116; DOI: [10.12086/oee.2024.240116](https://doi.org/10.12086/oee.2024.240116)

Foundation item: Project Supported by National Natural Science Foundation of China (62174025)

¹State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China; ²Chongqing Institute of Microelectronics Industry Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chongqing 401332, China

* E-mail: lxqian@uestc.edu.cn