

从单晶 MgZnO 到非晶 Ga₂O₃: 深紫外光电探测器的发展和选择

梁会力^{1,2}, 朱 锐¹, 杜小龙^{1,2}, 梅增霞^{1,2}

(1. 松山湖材料实验室 东莞 523808;

2. 中国科学院物理研究所 北京 100190)

摘要: 宽带隙半导体在研制无滤光片紧凑型日盲紫外探测器方面具有极大的发展潜力。本文结合本团队在分子束外延 MgZnO 单晶薄膜和磁控溅射非晶 Ga₂O₃ 薄膜以及相应日盲紫外探测器的研究经验, 综述了以 MgZnO 和非晶 Ga₂O₃ 为代表的宽带隙氧化物半导体深紫外探测器的研究进展, 发现非晶 Ga₂O₃ 薄膜拥有不输于单晶薄膜的深紫外响应特性。众多研究结果表明, 氧空位相关缺陷对器件性能起着至关重要的作用, 对其进行合理调控可有效提升器件性能。此外, 与氧空位缺陷相伴的持续光电导效应为开发深紫外光电突触器件提供了新的研究视角。最后, 针对上述研究中存在的问题进行剖析总结, 期望进一步推动宽带隙氧化物半导体材料, 尤其非晶 Ga₂O₃ 材料在未来深紫外探测方面的产业应用。

关键词: 日盲紫外; 光电探测器; 镁锌氧; 氧化镓; 非晶

中图分类号: 文献标识码:

DOI: 10. 37188/CJL. 20240266

CSTR: 32170. 14. CJL. 20240266

Deep UV detection: from single-crystalline MgZnO to amorphous Ga₂O₃

Liang Huili^{1,2}, Zhu Rui¹, Du Xiaolong^{1,2}, Mei Zengxia^{1,2}

(1. Songshan Lake Material Laboratory Dongguan, 523808. ;

2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190.)

Abstract: Wide bandgap semiconductors have great potential for the development of compact solar-blind ultraviolet detectors without filters. This article summarizes the research progress of deep ultraviolet photodetectors using wide bandgap oxide semiconductors including MgZnO and amorphous Ga₂O₃ (a-Ga₂O₃) thin films. It has been found that the photoresponse performance of a-Ga₂O₃ thin film is comparable or even better than those using crystalline thin films. Numerous results demonstrate that oxygen vacancy (V_O) defects play a crucial role in device performance. Based on the effective modulation of V_O defects, high performance solar-blind ultraviolet photodetectors can be successfully achieved. In addition, the persistent photoconductivity effect, which is usually accompanied by the presence of V_O defects in oxide materials, provides a new perspective for the development of optoelectronic synaptic devices in deep ultraviolet range. Finally, a short comment has been made concerning the above research progress as well as some unsolved issues. These advancements are expected to promote the industrial application of wide bandgap oxide semiconductor materials, especially a-Ga₂O₃, in deep ultraviolet detection in the future.

Key words: Solar-blind ultraviolet; Photodetector; MgZnO; Ga₂O₃; Amorphous

收稿日期: 2024-10-20; 修订日期: 2024-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金 (62174113, 12174275, 62404146); 广东省基础与应用基础研究基金 (2023A1515140094, 2023A1515110730, 2019B1515120057)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62174113, 12174275, 62404146); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023A1515140094, 2023A1515110730, 2019B1515120057)

1 前 言

日盲紫外辐射位于 220-280 nm,这一波段的太阳光在穿过大气层时会被臭氧层强烈吸收,在近地大气中几乎不存在。在这样的环境背景下,对该波段的紫外辐射进行探测或者成像,可以不受阳光干扰、背景干净,因而具有更高的信噪比、更低的误警率和独一无二的目标识别优势¹。因此,日盲紫外探测技术在天基、空载、舰载的预警系统中大有用武之地,在火灾预警与引擎监控、高压电晕检测与电力安全、杀菌消毒监测、日盲紫外通信、生化反应监测等领域也具有重要应用前景。

目前实用的日盲紫外探测器主要有光电倍增管和硅基紫外光电二极管。光电倍增管尽管拥有较高的灵敏度,但需要较高的工作电压和真空封装,体积大、效率低、易损坏且成本较高,不利于设备小型化及安全化。另外,由于 Si 材料带隙过窄,硅基紫外光电二极管在可见/红外波段会有更明显的响应,需要通过滤光片把响应限制在日盲波段,无疑增加了系统的体积和成本。

为研制无滤光片紧凑型日盲紫外探测器,各种宽禁带半导体材料,如金刚石、AlGa_N、MgZnO 和 Ga₂O₃ 等被广泛探索研究²。金刚石禁带宽度高达 5.5 eV,使得其只对波长短于 225 nm 的深紫外光敏感³,极大降低了对日盲紫外光的探测效率。以 AlGa_N 和 MgZnO 为代表的合金材料,可以通过改变金属元素的比例来调控禁带宽度,从而实现不同波段的光探测。对于 AlGa_N 来说,通过调控 Al 和 Ga 的组分比例,可使得材料的带隙在 3.39 eV (Ga_N 的带隙)至 6.2 eV (Al_N 的带隙)范围内调整,覆盖了几乎大部分紫外区域,在宽带隙半导体日盲紫外探测器研制方面最为成熟,已经实现焦平面阵列成像探测⁴。而 MgZnO 材料通过调整 Mg 组分可使得禁带宽度介于 ZnO (3.37 eV) 和 MgO (7.8 eV) 之间,同样具有实现日盲紫外探测的发展潜力⁵。然而 AlGa_N 和 MgZnO 的生长大多使用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 或分子束外延 (MBE) 技术,设备庞大而昂贵,外延工艺复杂且需要高温 (尤其对于 AlGa_N 材料,生长温度通常需要 1000 °C 以上),增加了薄膜的制备成本。

Ga₂O₃ 作为宽禁带氧化物半导体材料,带隙为 4.9 eV,其光响应峰值正好落在日盲紫外波段,且其吸收边附近的吸收系数高达 10^5 cm^{-1} ,是一种无需能带调控的天然日盲紫外探测材料⁶。此外,

Ga₂O₃ 材料成本低廉,热稳定性和化学稳定性都很好,且能耐受高达 8 MV/cm 的强电场,能够在严苛条件下实现器件的应用⁷⁻⁸。最近几年, Ga₂O₃ 基日盲紫外探测器已经成为了物理学领域的一大研究热点。众多综述文章围绕材料制备与缺陷调控、器件结构与器件性能等对 Ga₂O₃ 基日盲紫外探测器的研究进展进行了总结分析⁹⁻¹²,其中大部分工作都是基于稳定的 β -Ga₂O₃ 相,也有少部分研究报道了基于其它晶相的 Ga₂O₃ 基日盲紫外探测器¹³⁻¹⁴。

与此同时,短程有序的宽带隙非晶 Ga₂O₃ 薄膜可利用磁控溅射¹⁵、原子层沉积¹⁶等制备手段在硅、玻璃甚至塑料衬底上低温大面积均匀成膜,工艺简单,成本低廉。尤为重要的是,基于非晶 Ga₂O₃ 薄膜的日盲紫外探测器展示了不输于单晶薄膜的日盲紫外响应特性¹⁷⁻¹⁹,这一诱人的产业化应用前景吸引了众多研究团队的关注,已经有研究人员就近年非晶 Ga₂O₃ 薄膜日盲紫外探测器的研究进展进行了总结整理²⁰⁻²³。下面的章节中,我们将通过梳理国内外同行在 MgZnO 基深紫外探测器方面的研究结果,探寻基于氧化物半导体的深紫外光电探测器的发展规律,进一步详细总结非晶 Ga₂O₃ 日盲紫外探测器及其在新型光电器件方面的研究进展,期望能够进一步挖掘非晶 Ga₂O₃ 光电探测器的性能,促进相关光电探测器的发展。

2 MgZnO 基深紫外探测器

单纯 ZnO 材料的响应还远未达到日盲紫外波段,必须利用能带工程进行带隙调控。Mg 元素环境友好,离子半径 (Mg²⁺: 0.57 Å, Zn²⁺: 0.60 Å) 以及饱和蒸汽压 (Mg: 10^{-3} Torr @ 377 °C; Zn: 10^{-3} Torr @ 292 °C) 与 Zn 元素相差不大,非常有利于获得高质量的合金材料。然而 MgO 的热力学稳定相是立方岩盐结构, ZnO 为六角纤锌矿结构,其晶格结构上的巨大差异导致在中等 Mg 组分存在相分离的区域 (大约 37% 与 62% 之间)²⁴。日盲紫外波段刚好被覆盖在这一区域。针对上述问题,众多研究团队发展了不同的技术方案,通过提高纤锌矿相 MgZnO (W-MgZnO) 薄膜中的 Mg 组分和岩盐相 MgZnO (C-MgZnO) 薄膜中的 Zn 组分,分别从长波段和短波段逼近中等 Mg 组分 (或 Zn 组分),以获得带隙达到日盲紫外波段的 MgZnO 材料。

Zhanglong Liu 等人利用射频等离子体辅助分

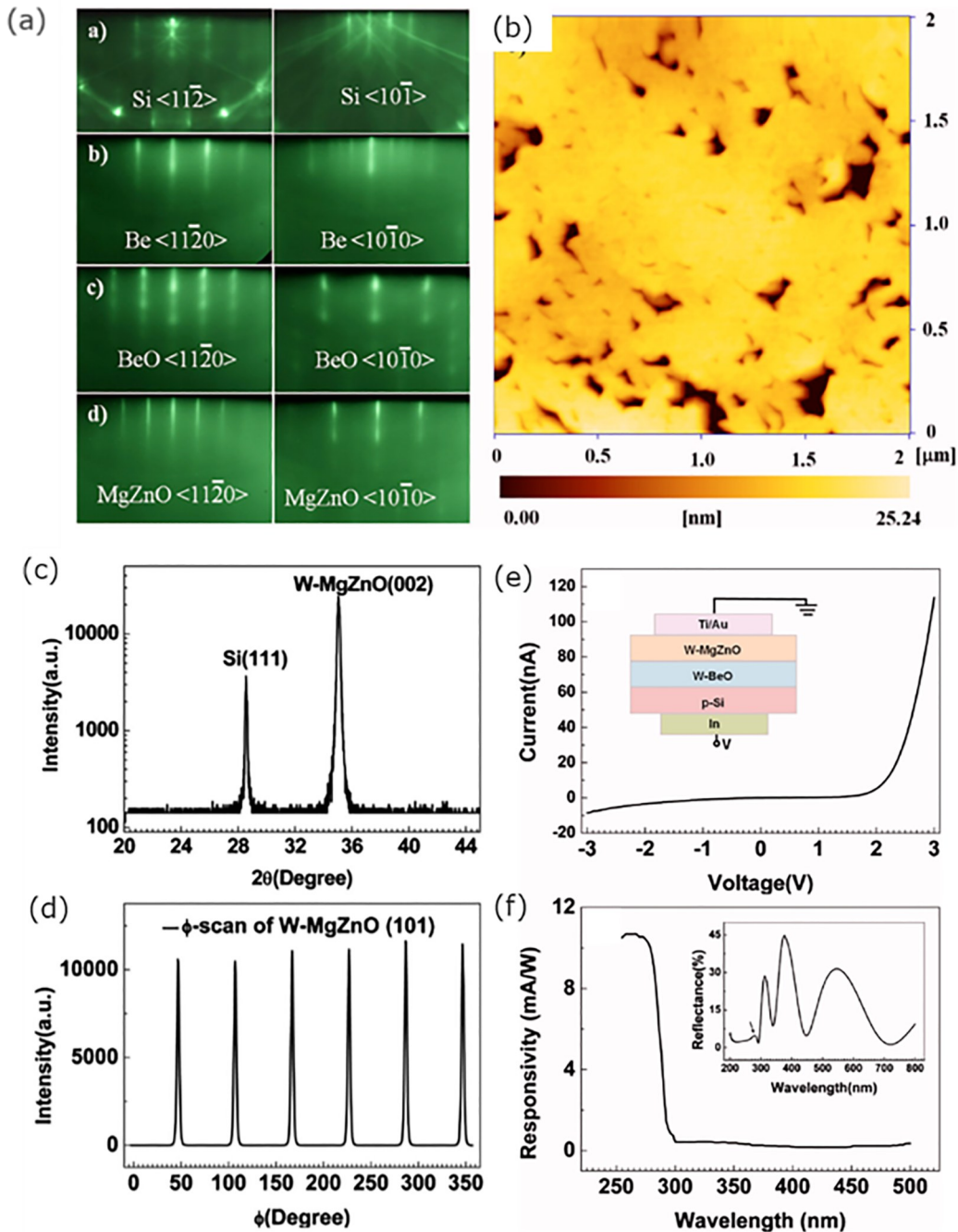


图1 (a) Si基MgZnO单晶薄膜的RHEED图案;(b) MgZnO单晶薄膜的原子力显微镜成像;(c)-(d)X射线衍射 θ -2 θ 扫描曲线及 ϕ 扫描曲线;(e)暗态下的I-V曲线,插图为器件结构示意图;(f) 0.5 V偏压下器件的光响应谱。³²

Fig. 1 (a) In-situ RHEED patterns during the growth process. (b) AFM image of the wurtzite MgZnO epilayer. (c)-(d) XRD θ -2 θ scan of W-MgZnO (002) plane and ϕ -scan of W-MgZnO (101) plane. (e) Dark I-V curve. The inset shows the detailed device structure. (f) Photoresponse spectrum at 0.5 V bias. The inset is the reflectance spectrum of the corresponding film.³²

子束外延系统,结合准同质外延模板工艺在蓝宝石衬底上获得了带隙达到日盲紫外波段的纤锌矿相MgZnO单晶薄膜材料。薄膜生长过程中的原位电子衍射图案(RHEED)、X射线衍射谱(XRD)以及确定合金组分配比的卢瑟福背散射谱(RBS),明确表明最终获得的薄膜为单一亚稳态纤锌矿相,

最高Mg组分达到55%,带隙为4.55 eV (272 nm),完全进入日盲区紫外波段²⁵。进一步他们又系统研究了纤锌矿相MgZnO单晶薄膜的光学性质²⁶。通过低温和变温光致发光和光激发谱,发现Mg_{0.55}Zn_{0.45}O的斯托克斯位移高达365 meV和变温激子发光峰反常移动现象,表明随着Mg组分增

加, MgZnO 合金薄膜中的组分波动逐渐加剧; 而“S 型”发光峰位的移动则揭示了激子在局域化势场中的热动力学过程。基于上述薄膜, 成功研制了平面叉指型日盲紫外探测器, 相应器件具有非常陡峭的日盲光响应截止边(270 nm)、较高的光谱响应(22 mA/W)和较快的响应时间(< 500 ns)²⁷。

利用 F 掺杂对纤锌矿相 MgZnO 单晶薄膜电性进行调控, 发现随着 Mg 组分增加, 薄膜中的 V_{Zn} 浓度增加, 自补偿效应增强, 使得薄膜电性变差; 后退火能促进复合体 $F_0^- - V_{Zn}^{2+}$ 的形成, 减少薄膜中的离子浓度, 减小散射作用, 有效提高载流子迁移率²⁸。相比未掺杂的本征 MgZnO 薄膜, 基于 F 掺杂薄膜制备的探测器光电流提升至少两个数量级²⁹⁻³⁰。

Si 材料具有低廉的价格和成熟的半导体集成电路工艺, 与其结合发展潜力巨大。Huili Liang 等人开展了 Si 基纤锌矿相 MgZnO 单晶薄膜紫外

探测器的研制, 利用沉积金属 Be 而后原位氧化的界面控制技术³¹, 保护 Si 表面在氧化物成核初期不被氧化的同时, 获得了同为纤锌矿结构的 BeO 外延模板, 非常有利于后续纤锌矿 MgZnO 单晶薄膜的生长, 最终将 Mg 组分提升至 44%, 带隙达到 4.43 eV (280 nm), 进入日盲紫外波段³²。薄膜表征部分见图 1(a)-(d)。基于此薄膜制备的 p-Si/n-MgZnO 异质结型日盲紫外探测器响应截止边位于 280 nm, 并且由于 Si 衬底以及 MgZnO 外延层能带结构所形成的天然带阶, 无需任何介电层即可抑制 Si 衬底一侧可见光响应。基于上述 Si 基 MgZnO 单晶薄膜, 进一步构建了双波段深紫外光电探测器。通过偏压调控, 截止波长可以在太阳盲(280 nm)/可见盲(301 nm)区域切换, 并显示出 2 个数量级的紫外/可见光抑制比和小于 100 毫秒的快速响应速度³³。

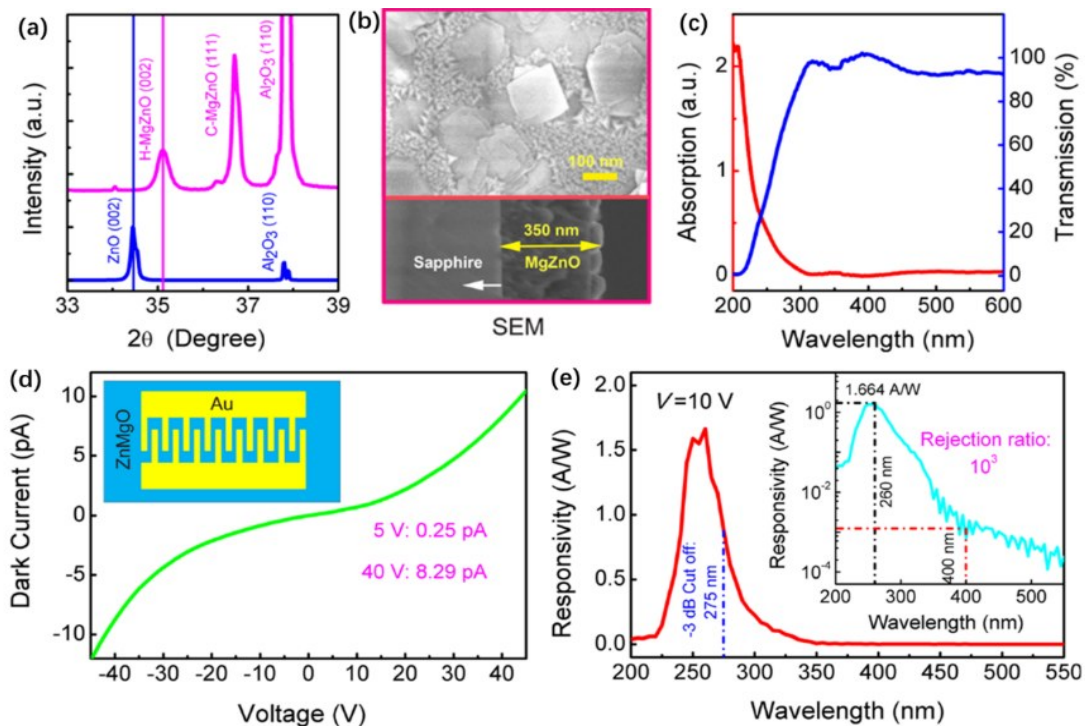


图 2 (a) m-MgZnO 和 ZnO 的 XRD 光谱; (b) m-MgZnO 的扫描电子成像图; (c) m-MgZnO 的透射和吸收光谱; (d) m-MgZnO 光电探测器在暗态的 I-V 曲线, 插图为器件结构示意图; (e) 在 10 V 偏压下器件的光谱响应。插图为对数坐标。⁴⁴

Fig. 2 (a) XRD spectra of m-MgZnO and ZnO. (b) SEM images, and (c) Transmission and absorption spectra of m-MgZnO. (d) I-V curve in dark. The inset is schematic illustration of MSM structure. (e) Spectral response of the photodetector at 10 V bias. The inset shows the spectral response in logarithmic scale.⁴⁴

ZnO 单晶衬底可为高质量低应变的纤锌矿相 MgZnO 单晶薄膜提供良好的模板, 但却存在来自 ZnO 单晶衬底的长波段响应。为利用 ZnO 单晶衬底的优势, 并降低来自衬底的长波响应, Qinghong Zheng 等人利用磁控溅射技术, 制备了厚度高达 2

μm 的纤锌矿相 MgZnO 单晶薄膜, 相应的日盲紫外探测器响应峰值为 260 nm, 响应度为 304 mA/W, 响应抑制比($R_{260\text{ nm}}/R_{365\text{ nm}}$) 超过两个数量级³⁴。考虑到分子束外延设备生长速率非常缓慢, 制备微米量级以上的薄膜耗时长久, Huili Liang 等人

提出引入同为纤锌矿相的 BeO 插入层, 利用其高达 10.6 eV 的带隙, 有效抑制了来自 ZnO 单晶衬底的响应, 位于 260 nm 的峰值响应度为 20 mA/W, 响应抑制比超过两个数量级³⁵。

此外, Qinghong Zheng 等人利用磁控溅射技术在石英玻璃衬底上制备了 400 nm 厚的纤锌矿相 MgZnO 薄膜和相应的平面叉指型日盲紫外探测器。在 10 V 偏压下, 265 nm 处的峰值响应度高达 3.4 A/W, 响应抑制比超过 3 个数量级。他们认为器件的高响应度来自于深能级缺陷对空穴的捕获以及由于电中性要求而产生的电子持续注入增益³⁶。

相比纤锌矿相 MgZnO 单晶薄膜, 岩盐结构的 MgZnO 薄膜是以 MgO 为母体, 增加其中的 Zn 组分, 相对更容易获得日盲紫外波段的带隙。中科院长春光机所研究团队长期关注于岩盐相 MgZnO 单晶薄膜的日盲紫外探测器研制。2008 年鞠振刚等人报道了利用金属有机物化学气象沉积设备研制的岩盐相 MgZnO 日盲紫外探测器, 响应峰值在 250 nm 处, 峰值响应度为 50 μ A/W, 紫外可见抑制比接近四个量级³⁷。2009 年他们在低温富氧条件下进一步优化岩盐相 MgZnO 单晶薄膜质量, 将器件在 246 nm 的峰值响应度提升为 396 mA/W, 为当时 MgZnO 日盲紫外探测器报道的最高值³⁸。中科院物理所研究团队通过改变衬底温度及外延模板, 系统研究了温度及模板极性对岩盐相 MgZnO 单晶薄膜中 Zn 组分的影响。低温可有效增加 Zn 原子在衬底上的寿命, 利用较低的 Zn/Mg 束流比, 在基于蓝宝石衬底的 MgO (111) 模板上获得了 Zn 组分为 47%、带隙为 5.12 eV (242 nm) 的岩盐相 MgZnO 单晶薄膜³⁹; 低温条件下, 采用无应变的 MgO (001) 非极性模板, 由于其表面自由能较低, 有助于 Zn 原子进入非平衡亚稳相岩盐结构中, 将 Zn 组分进一步提高到 70%、带隙达到 4.85 eV (255.5 nm)⁴⁰。

2014 年, 中科院长春光机所 Xiuhua Xie 等人利用 Ga 元素对岩盐相 MgZnO 单晶薄膜进行电性调控, 与非掺杂岩盐相 MgZnO 薄膜相比, 器件响应度提升了 50 倍⁴¹。他们还通过构建梯度带隙 MgZnO 薄膜, 在 Si 衬底上实现了高增益的岩盐相 MgZnO 日盲紫外探测器, 240 nm 附近的峰值响应度高达 1.16 A/W, 器件衰减时间最快为 15 μ s, 展现了优异的深紫外响应特性⁴²。

包含纤锌矿相和岩盐相的混相 MgZnO (m-MgZnO) 薄膜在日盲和可见盲两个波段均存在响应截止边⁴³, 尽管响应度较高, 但通常认为是研制单一相 MgZnO 薄膜及日盲紫外探测器的副产物。为将混合相 MgZnO 紫外探测器的响应截止边调整到单一的日盲波段, M. M. Fan 等人采用非极性 α -Al₂O₃ 单晶衬底, 利用等离子体增强分子束外延设备, 提升混合相中纤锌矿相 MgZnO 薄膜 Mg 组分⁴⁴, 如图 2 所示。他们成功获得了单一响应截止边的日盲紫外探测器, 位于 260 nm 的峰值响应度为 1.664 A/W, 响应抑制比 ($R_{260\text{nm}}/R_{400\text{nm}}$) 高达三个量级以上, 然而由于其响应增益来自于晶界处的束缚空穴, 导致器件的响应时间较慢, 不同偏压下衰减时间长达 1~2 s。深圳大学 S. Han 等人利用脉冲激光沉积手段, 研究了混合相中岩盐结构 MgZnO 取向对器件性能的影响, 发现混合相中含有 (002) 岩盐结构的 MgZnO 探测器具有更高的响应度, 250 nm 处的峰值响应度达到 8 A/W, 进一步展示了混合相 MgZnO 在深紫外探测方面的应用潜力⁴⁵。

前述 MgZnO 薄膜日盲紫外探测器的研究历程显示, 高质量单晶薄膜的器件响应度反而低于混合相薄膜, 其中存在的晶界缺陷对器件性能有重要影响, 预示着片面追求高质量合金薄膜并不能全面提升器件的紫外响应特性。此外, 为精确调控带隙, 实现日盲紫外波段探测, 通常所涉及的生长工艺较为复杂, 设备昂贵, 极大制约了其产业化应用。特别需要指出的是, p 型掺杂难题严重制约了具有内部光电流增益的 MgZnO 深紫外探测器的发展⁴⁶。与此同时, 无需能带调控的天然日盲紫外探测材料——氧化镓开始崭露头角。众多研究团队开展了基于单晶氧化镓材料的日盲紫外探测器研究, 并取得了丰硕的研究结果⁹⁻¹²。然而, 单晶氧化镓的制备过程较为复杂, 生长温度较高, p 型掺杂困难, 同样面临 MgZnO 薄膜产业应用的瓶颈。

3 非晶氧化镓薄膜深紫外探测器

相比于单晶或多晶材料, 非晶材料具有同质无晶界、可低温大面积制备、与柔性基底兼容、成本低廉等优势, 在“巨微电子”领域展现出强劲的发展潜力。以日本科学家 Hosono 等人提出的 In-GaZnO (IGZO) 为主要代表的非晶氧化物半导体⁴⁷, 具有独特的电子传输性能, 尽管在结构上长

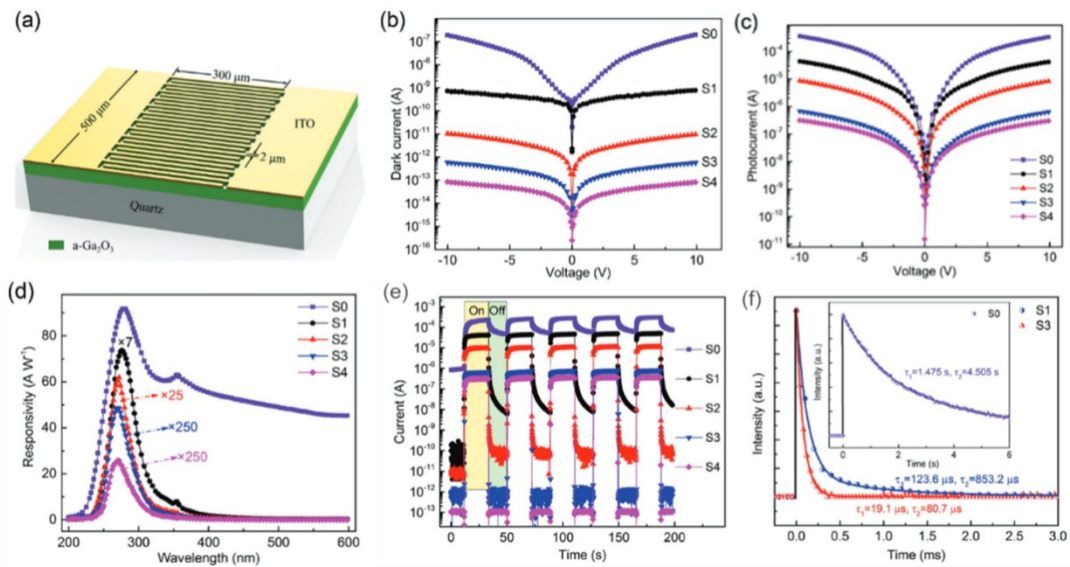


图3 (a) MSM结构探测器的示意图;(b) 暗态下器件的I-V关系曲线;(c) 254 nm紫外光辐照下器件的I-V关系曲线;(d) 20 V偏压下的光响应谱;(e) 10 V偏压下周期紫外光辐照下电流随时间变化曲线;(f) 瞬态KrF脉冲激光响应速度测试结果。备注:氧空位浓度从S0到S4逐渐减小。¹⁷

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the MSM structured Ga_2O_3 photodetector. (b) I - V curves in dark and (c) under UV 254 nm light illumination. (d) Photoresponsivity spectra of the photodetector biased at 20 V. (e) Time-dependent photoresponse under periodic UV 254 nm light illumination at 10 V bias. (f) Temporal response tests under KrF pulse laser illumination at 10 V bias.¹⁷

程无序,却拥有较高的电子迁移率,可利用磁控溅射工艺在硅、玻璃甚至塑料衬底上实现低温大面积均匀成膜。 Ga 元素是构成IGZO材料中的重要元素之一,不同于 ZnO 及 In_2O_3 易于晶化的倾向, Ga_2O_3 材料在很大温度范围内沉积时均可获得大面积均匀非晶薄膜,在十多年前就已经引起研究人员关注⁴⁸。此外,利用磁控溅射设备沉积的非晶 Ga_2O_3 薄膜,由于保留了短程有序,其吸收截止边和吸收系数与晶态材料无异,显示出日盲紫外探测的潜在应用¹⁷。尤其2017年,三个不同的科研团队同时发表了基于非晶 Ga_2O_3 薄膜的深紫外探测器,展现出丝毫不输于单晶薄膜的响应特性¹⁷⁻¹⁹。这一现象迅速引起研究人员的关注。

Shujuan Cui等人通过微量调控磁控溅射生长过程中的氧分压,分别在石英玻璃和塑料PEN衬底上室温沉积非晶 Ga_2O_3 薄膜,并制备了相应的日盲紫外探测器,发现氧空位缺陷对器件性能有重要影响,如图3所示,随着氧空位缺陷的减少,器件关光后的电流衰减速度大幅提升,衰减时间从1.5 s减小到19.1 μs ,器件的紫外可见抑制比也大幅改善。然而,氧空位缺陷的减少也带来了另外的弊端,即器件的光响应度从98.11 A/W降

低到了0.19 A/W¹⁷。Ling-Xuan Qian等人则对比了磁控溅射的非晶 Ga_2O_3 薄膜和MBE制备的 β - Ga_2O_3 薄膜的深紫外响应特性,发现由于缺陷带来的内部增益效果,非晶薄膜的响应度(70.26 A/W)远高于晶相薄膜(4.21 A/W),并且基于非晶薄膜的响应速度也比晶相稍快,直接证明了非晶薄膜优异的深紫外响应特性¹⁸。同一年, Lee等人则利用原子层沉积方法,在塑料PI基板上沉积非晶 Ga_2O_3 薄膜,薄膜厚度仅为30 nm时,相应深紫外探测器具有最优性能,器件峰值响应度为45.11 A/W@253 nm,紫外可见抑制比超过两个数量级,器件衰减时间为148 μs ¹⁹。

上述三篇工作开启了非晶 Ga_2O_3 深紫外探测器的研究热潮。部分有代表性的工作如下: Yancheng Chen等人基于非晶 Ga_2O_3 薄膜可低温大面积均匀沉积的优势,利用折纸工艺在柔性塑料衬底上实现了3D光电探测器阵列的研制⁴⁹; Haitao Zhou等人巧妙利用非晶 Ga_2O_3 薄膜中丰富的带间缺陷,实现了超宽波段的光电探测,并通过短时间加热使得器件快速恢复至初始状态⁵⁰; Zuyin Han等人则开发了一种使用TMAH溶液对非晶 Ga_2O_3 沟道层进行选择化学蚀刻的方法,而后制备了薄膜晶体管结构的光电探测器,通过引入第

三端栅极调控, 实现高光响应度与快速刷新兼备的器件性能⁵¹; Yuehui Wang 等改变磁控溅射过程中薄膜沉积温度(室温到 750°), 发现在 450° 形成

的晶相/非晶 Ga₂O₃ 异质结可大幅提升器件的响应特性⁵²。Liang 等人于 2020 年对上述研究进展进行了详细的综述整理²⁰, 在此不做赘述。

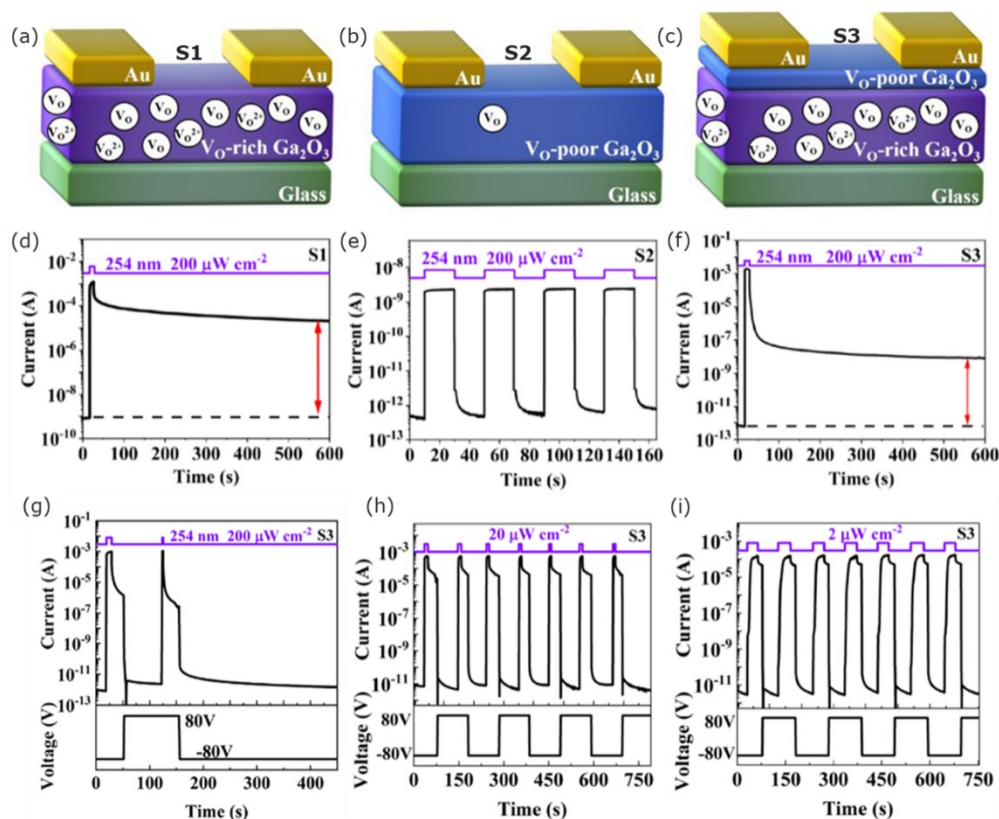


图 4 (a)-(c) MSM 结构探测器示意图; (d)-(f) 上述三种器件结构在周期性 254nm 紫外光辐照下电流随时间变化曲线; (g)-(i) 双层器件在周期电压偏置, 不同光功率密度的周期光辐照下的电流随时间变化曲线。⁵⁵

Fig. 4 (a)-(c) Schematic diagram of the MSM structured Ga₂O₃ photodetectors with different active layers. (d)-(f) Transient photoresponse of the above three different photodetectors under UV 254 nm light illumination. (g)-(i) Transient photoresponse of the double-layer device under UV 254 nm light illumination with different optical density.⁵⁵

然而, 如 A Y Polyakov 等人在最近的综述文章中所述, 基于 Ga₂O₃ 材料的日盲紫外探测器, 包括不同晶型甚至是非晶相, 其高响应度背后的代价是牺牲了器件的响应速度和恢复速度, 极大限制了其应用场景⁵³。单纯依靠单层氧化镓薄膜调节氧空位浓度, 很难获得兼具高探测率、高紫外可见抑制比和快速刷新速率的紫外探测器^{17, 54}。为解决上述问题, 2022 年 Rui Zhu 等人从缺陷调控和器件设计两方面入手, 构筑了双有源层(V₀-rich/V₀-poor Ga₂O₃) 的两端器件结构, 如图 4 所示⁵⁵。该双层结构克服了两种单层结构各自的劣势、较好地利用了它们的优势。通过优化薄膜及器件工艺参数, 最终获得了 8.7×10^{17} Jones 的超高探测率; 另外, 由于 V₀-poor Ga₂O₃ 层对可见光几乎无响应, 还实现了高达 10⁸ 的紫外可见抑制比。更重要的是, 首次开发了一种简单有效的猝灭工作

模式(图 4g-i), 即利用方波信号源来周期性改变偏压方向, 有效抑制了氧化物半导体中常见的持续光电导现象, 从而实现了快速的刷新频率。

引入第三端栅极调控制备光电薄膜晶体管器件, 从器件结构角度出发, 为快速擦除持续光电导效应, 获得兼具高响应度和快刷新频率提供了一种解决方案。然而由于非晶 Ga₂O₃ 材料的宽带隙, 其中的沟道层材料必须在缺氧条件下制备, 才能实现晶体管基本的开启特性⁵¹。丰富的氧空位缺陷尽管为沟道层提供了一定的载流子, 却也带来了近可见光波段的光响应, 严重影响了器件的紫外可见抑制比。为解决上述问题, 研究人员提出构建异质结型沟道层材料, 引入富含载流子的低阻层来钝化界面缺陷, 为器件开启提供必要的载流子浓度。如 Zuyin Han 等人引入低阻 IGZO 超薄插入层作为载流子库, 并在随后的非晶 Ga₂O₃

沟道层生长过程中通入 O_2 , 减少沟道中的氧空位缺陷, 使得器件的稳定性、迁移率和紫外可见抑制比均得到了很大提升⁵⁶。同时, 在栅极正向偏压脉冲的作用下, 器件持续光电导效应也得到了明显抑制。Haofei Huang 等人则构建了 $ZnO:Mg/a-Ga_2O_3$ 异质结沟道层, 获得了基本的薄膜晶体管器件性能, 并实现了对紫外和 X 射线的探测⁵⁷。然而, 如前所述, 非晶 Ga_2O_3 薄膜晶体管中沟道层载流子要么来自于其中的氧空位缺陷, 要么是引入相对窄带隙的界面层形成异质结, 难以避免地出现来自长波的响应, 从而恶化器件的紫外可见抑制比。

为进一步提升非晶 Ga_2O_3 光电探测器的性能, 2021 年 Yuan Qin 等人于器件完成后在 400°C 氮气氛中进行后退火处理, 在非晶 Ga_2O_3 薄膜中引入部分结晶相, 提升薄膜中的载流子迁移率并降低缺陷浓度, 将器件响应度进一步提升至 733 A/W , 关光后电流的衰减时间提升至 18 ms , 响应抑制比 ($R_{245}/R_{400\text{nm}}$) 高达 5×10^3 。此外, 他们还研制了 32×32 的阵列器件, 初步实现了成像探测⁵⁸。与之类似, 近期 Yanghua Chen 等人通过改变后退火温度调控非晶 Ga_2O_3 薄膜中的纳米晶粒尺寸, 同样大幅提升了器件性能⁵⁹。

对非晶 Ga_2O_3 薄膜进行掺杂, 也是一种提升器件光电性能的手段。氢元素作为真空室中顽固的残余气体, 经常被无意中掺杂到半导体材料中, 极大影响材料的电学性能。Yanxin Sui 等人在生长环境中原位引入氢气束流, 在不同含氢氛围下制备了一系列非晶氧化镓薄膜和相应的紫外光电探测器。发现: 适量的氢元素可以在降低器件暗电流的同时维持较高的光电流, 从而有效提升了器件的光暗比⁶⁰。Yiming Liu 等人则在器件完成后沉积有机硅钝化层, 间接在材料表面引入氢元素, 将器件响应度提升至 11.82 A/W , 相比无钝化层器件提升了接近一个量级⁶¹。

鉴于非晶 Ga_2O_3 薄膜对衬底的巨大兼容性, 研究人员还构建了形形色色的异质结器件, 如 $PtSe_2/a-Ga_2O_3$ 异质结⁶², $PbI_2/a-Ga_2O_3$ 异质结⁶³ 等, 以期利用异质结的内建电场实现低功耗的自供电工作模式。此外, 由于衬底的兼容性, 非晶 Ga_2O_3 在柔性光电探测器方面也大有发展, 碳纤维布⁶⁴, 甚至是纸张⁶⁵ 都可以作为衬底制备非晶 Ga_2O_3 光电探测器, 极大拓宽了器件的应用场景。

值得一提的是, 以上工作都是从传统紫外光电探测器要求出发, 追求高灵敏度, 高响应速度等指标。实际上, 光作为一种电磁波, 除了光强和波长之外, 其偏振态也是一个重要的特征参数, 对其进行探测可以获得更加丰富的信息。各向异性的 $\beta-Ga_2O_3$ 单晶材料, 由于其结构的特殊性, 天然可以实现深紫外偏振光探测, 因而成功将偏振光探测范围从常见的红外和可见蓝移到了深紫外波段⁶⁶⁻⁶⁷。对于缺乏长程有序的非晶 Ga_2O_3 材料, 其自身难以分辨入射紫外光的偏振信息, 但凭借其优异的界面兼容性, 可以和亚波长的金属光栅结合, 同样可以获得深紫外偏振探测的功能⁶⁸。

此外, 非晶 Ga_2O_3 材料在新型光电子器件方面也有很重要的发展。例如, 持续光电导效应虽然在传统光电探测领域总是不受欢迎, 但却在新型光电突触器件方面有着巨大发展潜力⁶⁹⁻⁷¹。结合非晶氧化镓材料的高光响应度 ($>10^3\text{ A/W}$) 和超强持续光电导效应, Rui Zhu 等人首次利用非晶氧化镓作为光敏层制备了光电突触器件, 实现了基本的突触可塑性和噪声抑制功能⁶⁹。尤为值得一提的是, 触发单次长程可塑性的功耗仅为 136 fJ , 非常接近生物突触的水平, 展示了其在低功耗神经视觉系统方面的应用潜力。Zhongfang Zhang 等人通过富镓设计获得了基于持续光电导效应的非晶 Ga_2O_3 光电突触, 并与忆阻器阵列结合, 构建了用于潜在指纹识别的感存算一体系统⁷⁰。基于非晶氧化镓优良的光电响应特性, Rui Zhu 等人设计开发了基于非晶氧化镓光敏介质层的新型光电存储器件⁷², 最高操作电压仅为 4.5 V , 并且能够实现多态存储。该器件结构不依赖于沟道材料的种类, 具有较强的可移植性, 可面向不同的应用场景。上述工作展示了非晶 Ga_2O_3 材料在新型光电器件方面的研究进展, 进一步开拓了非晶 Ga_2O_3 材料的应用领域。

4 总结和展望

宽禁带半导体一直是研究无滤光片紧凑型固态深紫外探测器的优选材料。通过梳理单一相和混合相 $MgZnO$ 薄膜以及非晶 Ga_2O_3 薄膜深紫外探测器的研究进展, 可以发现, 器件响应特性与薄膜的结晶质量并不总是正相关。表 1 总结了本文涉及的有代表性的 $MgZnO$ 与非晶 Ga_2O_3 薄膜日盲紫外探测器的性能参数, 进一步证明了上述结论。虽然非晶 Ga_2O_3 薄膜结构上长程无序, 材料迁移

表 1 基于纤锌矿相 MgZnO、岩盐相 MgZnO、混合相 MgZnO、非晶 Ga₂O₃ 和 β -Ga₂O₃ 等薄膜的日盲紫外探测器性能参数对比。Table 1 Comparison of parameters of solar-blind UV photodetectors using wurtzite MgZnO, cubic MgZnO, mixed-phase MgZnO, amorphous Ga₂O₃ and β -Ga₂O₃.

Materials and Structures	Methods	R (A/W)	I _{dark} (A)	D* (Jones)	Decay		Ref
					Time (ms)	Rejection ratio	
W-MgZnO MSM	MBE	0.022	3×10 ⁻¹⁰	----	<5×10 ⁻⁴	>10 ² R ₂₆₀ /R _{400nm}	27
W-MgZnO/p-Si	MBE	~0.01	<2×10 ⁻⁹	----	----	----	32
W-MgZnO MSM	Sputtering	3.4	----	----	0.482	>10 ³ R ₂₆₅ /R _{400nm}	36
C-MgZnO MSM	MOCVD	0.396	4.5×10 ⁻¹³	----	----	>10 R ₂₄₆ /R _{390nm}	38
C-MgZnO/i-MgO/p-Si	MOCVD	1.16	~10 ⁻⁷	----	0.015	~100 R ₂₄₀ /R _{600nm}	42
m-MgZnO MSM	MBE	1.664	2.5×10 ⁻¹³	----	~1000	>10 ³ R ₂₆₀ /R _{600nm}	44
m-MgZnO	PLD	8	2.5×10 ⁻¹²	----	----	----	45
a-Ga ₂ O ₃ MSM	Sputtering	98.11	~2×10 ⁻⁷	----	1475	----	17
a-Ga ₂ O ₃ MSM	Sputtering	0.19	<1×10 ⁻¹²	----	0.019	----	17
a-Ga ₂ O ₃ MSM	Sputtering	70.26	3.4×10 ⁻¹⁰	1.26×10 ¹⁴	20	1.15×10 ⁵ R ₂₅₀ /R _{350nm}	18
a-Ga ₂ O ₃ MSM	ALD	45.11	2×10 ⁻¹⁰	----	0.148	558 R ₂₅₃ /R _{400nm}	19
a-Ga ₂ O ₃ MSM	PLD	1099	9.2×10 ⁻⁶	----	≤9000	~4 R ₂₅₀ /R _{350nm}	50
a-GaO _x phototransistor amorphous/ crystalline-Ga ₂ O ₃	Sputtering	5.67×10 ³	~10 ⁻¹²	1.87×10 ¹⁵	5	----	51
a-Ga ₂ O ₃ MSM	Sputtering	0.81	~10 ⁻¹³	5.67×10 ¹⁴	0.0196	8.1×10 ⁴ R ₂₅₀ /R _{400nm}	52
a-Ga ₂ O ₃ MSM	Sputtering	733	3×10 ⁻¹³	3.9×10 ¹⁶	18	5×10 ³ R ₂₄₅ /R _{400nm}	58
a-Ga ₂ O ₃ MSM	Sputtering	4.2×10 ³	4.9×10 ⁻¹³	8.7×10 ¹⁷	----	~10 ⁸ R ₂₄₅ /R _{400nm}	55
a-Ga ₂ O ₃ MSM	Sputtering	11.82	2.96×10 ⁻¹²	9.01×10 ¹⁴	55	~10 ² R ₂₅₀ /R _{400nm}	61
β -Ga ₂ O ₃ MSM	MOCVD	46	<10 ⁻¹²	9.8×10 ¹⁵	0.0267	>10 ⁷ R ₂₅₄ /R _{365nm}	73
β -Ga ₂ O ₃ /MgO/Nb:SrTiO ₃ heterojunction	PLD	4.46×10 ⁵	~10 ⁻⁹	2.33×10 ¹⁶	0.0417	----	74

率不高,但由于材料缺陷带来的增益效果,它的深紫外响应特性不输于甚至优于单晶薄膜。考虑到其简单的制备工艺、在任意衬底上可低温大面积均匀成膜的特性,对其进行研究开发更具有产业应用前景。

尽管取得了上述研究进展,但目前为止还存在一些不足,值得去深入探讨和开发:

1、器件性能的综合提升与优化:非晶 Ga₂O₃

深紫外探测器的突出优势为高响应度,如何在确保高响应度的同时维持优异的时间响应特性,依然是困扰高性能非晶 Ga₂O₃ 深紫外探测器的关键问题,尤其是涉及快速动态响应的高端应用。

2、非晶氧化镓材料与缺陷研究:由于缺乏长程有序性,对非晶氧化镓材料的研究,是一项从理论计算到实验表征都非常具有挑战的任务。

3、器件物理的深入挖掘和器件结构的创新设

计:现有的氧化物紫外光电探测器多是基于简单的MSM两端器件或者三端薄膜晶体管器件,开发新颖器件结构有望大大提升现有器件性能。

4、针对应用场景优化器件性能:片面追求单一参数,并不能有效推动器件的产业应用。未来应落实具体应用场景,针对具体应用优化相关参数。

从单晶MgZnO材料到非晶Ga₂O₃薄膜的研究历程表明,缺陷调控是实现器件性能的基础。看似难以调控的非晶Ga₂O₃材料不仅在传统的紫外光电探测领域大放异彩,未来还有望应用至新型光电突触、光电存储等方面。对其进行深入而系统的研究,无论是从基础科学研究还是从产业应用角度都意义重大。

参 考 文 献:

- [1] Razeghi, M. ; Rogalski, A. Semiconductor Ultraviolet Detectors. J. Appl. Phys. 1996, 79 (10), 41.
- [2] Xie C. ; Lu X. ; Tong X. ; alet, Recent Progress in Solar-Blind Deep-Ultraviolet Photodetectors Based on Inorganic Ultra-wide Bandgap Semiconductors. Adv. Funct. Mater. 2019, 29 (9), 1806006.
- [3] Lin C. ; Lu Y. ; Yang X. ; alet, Diamond-Based All-Carbon Photodetectors for Solar-Blind Imaging. Adv. Optical Mater. 2018, 6 (15), 1800068.
- [4] Cai Q. ; You H. ; Guo H. ; alet, Progress on AlGaN-Based Solar-Blind Ultraviolet Photodetectors and Focal Plane Arrays. Light Sci. Appl. 2021, 10 (1), 94.
- [5] Yang, J. -L. ; Liu, K. -W. ; Shen, D. -Z. Recent Progress of ZnMgO Ultraviolet Photodetector. Chin. Phys. B 2017, 26 (4), 047308.
- [6] Orita M. ; Ohta H. ; Hirano M. ; alet, Deep-Ultraviolet Transparent Conductive β -Ga₂O₃ Thin Films. Appl. Phys. Lett. 2000, 77 (25), 4166 - 4168.
- [7] Pearton S. J. ; Yang J. ; Cary P. H. ; alet, Review of Ga₂O₃ Materials, Processing, and Devices. Appl. Phys. Rev. 2018, 5 (1), 011301.
- [8] Hou X. ; Zhao X. ; Zhang Y. ; alet, High-Performance Harsh-Environment-Resistant GaO_x Solar-Blind Photodetectors via Defect and Doping Engineering. Adv. Mater. 2022, 34 (1), 2106923.
- [9] Hou X. ; Zou Y. ; Ding M. ; alet, Review of Polymorphous Ga₂O₃ Materials and Their Solar-Blind Photodetector Applications. J. Phys. D: Appl. Phys. 2021, 54 (4), 043001.
- [10] Shen Leyun, Zhang Tao, Liu Yunze, alet, Research progress in solar-blind UV detectors based on wide-band semiconductor Ga₂O₃, *Journal of Materials Engineering* 2023, 51 (10) 13-26 (in Chinese). 沈乐响,张涛,刘云泽,等,宽禁带半导体Ga₂O₃基日盲紫外探测器的研究进展,材料工程 2023,51 (10) 13-26。
- [11] Wang Jiang, Luo Linbao, Advances in Ga₂O₃-Based Solar-Blind Ultraviolet Photodetectors, Chinese Journal of Lasers 2021, 48 (11) 1100001-1 (in Chinese). 王江,罗林保,基于氧化镓日盲紫外光电探测器的研究进展,中国激光 2021, 48(11) 1100001-1。
- [12] Chen H. ; Li Z. ; Zhang Z. ; alet, Review of β -Ga₂O₃ Solar-Blind Ultraviolet Photodetector: Growth, Device, and Application. *Semicond. Sci. Technol.* 2024, 39 (6), 063001.
- [13] Qin Y. ; Li L. ; Zhao X. ; alet, ϵ -GaMetal - Semiconductor - Metal₂O₃ Solar-Blind Photodetectors with a Record-High Responsivity Rejection Ratio and Their Gain Mechanism. ACS Photonics 2020, 7 (3), 812 - 820.
- [14] Liu Z. ; Huang Y. ; Zhang C. ; alet, Fabrication of ϵ -Ga₂O₃ Solar-Blind Photodetector with Symmetric Interdigital Schottky Contacts Responding to Low Intensity Light Signal. J. Phys. D: Appl. Phys. 2020, 53 (29), 295109.
- [15] Cui Shujuan, Research on Gallium Oxide Based Photodetectors, A thesis submitted to University of Chinese Academy of Sciences (2018). 崔书娟,氧化镓基光电探测器的研制与研究,中国科学院大学(中国科学院物理研究所)2018。
- [16] Zhou Changqi, Preparation and Study on the Characteristics of Amorphous Ga₂O₃ Thin Films and Their Solar-Blind Ultraviolet Photodetectors, A dissertation submitted to University of Chinese Academy of Sciences (2020). 周长祺,非晶态Ga₂O₃薄膜及其日盲紫外探测器的制备和特性研究,中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)2020。
- [17] Cui S. ; Mei Z. ; Zhang Y. ; alet, Room-Temperature Fabricated Amorphous Ga₂O₃ High-Response-Speed Solar-Blind Photodetector on Rigid and Flexible Substrates. Adv. Optical Mater. 2017, 5 (19), 1700454.

- [18] Qian L. -X. ; Wu Z. -H. ; Zhang Y. -Y. ; alet, Ultrahigh-Responsivity, Rapid-Recovery, Solar-Blind Photodetector Based on Highly Nonstoichiometric Amorphous Gallium Oxide. *ACS Photonics* 2017, 4 (9), 2203 - 2211.
- [19] Lee S. H. ; Kim S. B. ; Moon Y. -J. ; alet, High-Responsivity Deep-Ultraviolet-Selective Photodetectors Using Ultrathin Gallium Oxide Films. *ACS Photonics* 2017, 4 (11), 2937 - 2943.
- [20] Liang, H. ; Han, Z. ; Mei, Z. Recent Progress of Deep Ultraviolet Photodetectors Using Amorphous Gallium Oxide Thin Films. *Phys. Status Solidi A* 2020, 2000339.
- [21] Ding Yue, HuangFu Qianqian, Zuo Qingyuan, *et al.* Preparation and Properties of PEN Substrate Gallium Oxide Based Flexible Ultraviolet Detector (Invited), *Acta Photonica Sinica* 2024, 53 (7) 0753305 (in Chinese). 丁悦, 皇甫倩倩, 左清源, 等, PEN 衬底氧化镓基柔性紫外探测器的制备与性能研究(特邀), *光子学报* 2024, 53 (7) 0753305。
- [22] Xiao Y, Yang S S, Cheng L Y, *et al.* Research progress of solar-blind UV photodetectors based on amorphous gallium oxide. *Opto-Electron Eng* 2023, 50 (6) 230005 (in Chinese). 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, *光电工程* 2023, 50 (6) 230005。
- [23] Xi Z. -Y. ; Yang L. -L. ; Shu L. -C. ; alet, The Growth and Expansive Applications of Amorphous Ga₂O₃. *Chin. Phys. B* 2023, 32 (8), 088502.
- [24] Yang W. ; Hullavarad S. S. ; Nagaraj B. ; alet, Compositionally-Tuned Epitaxial Cubic Mg_xZn_{1-x}O on Si (100) for Deep Ultraviolet Photodetectors. *Appl. Phys. Lett.* 2003, 82 (20), 3424 - 3426.
- [25] Liu Z. L. ; Mei Z. X. ; Zhang T. C. ; alet, Solar-Blind 4.55 eV Band Gap Mg_{0.55}Zn_{0.45}O Components Fabricated Using Quasi-Homo Buffers. *Journal of Crystal Growth* 2009, 311 (18), 4356 - 4359.
- [26] Liu Z. L. ; Mei Z. X. ; Wang R. ; alet, Alloy-Fluctuation-Induced Exciton Localization in High-Mg-Content (0.27 ≤ x ≤ 0.55) Wurtzite Mg_xZn_{1-x}O Epilayers. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010, 43 (28), 285402.
- [27] Hou Y. N. ; Mei Z. X. ; Liu Z. L. ; alet, Mg_{0.55}Zn_{0.45}O Solar-Blind Ultraviolet Detector with High Photoresponse Performance and Large Internal Gain. *Appl. Phys. Lett.* 2011, 98 (10), 103506.
- [28] Liu L. ; Mei Z. ; Tang A. ; alet, Self-Compensation Induced High-Resistivity in MgZnO. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017, 50 (6), 065102.
- [29] Liu L. ; Mei Z. ; Hou Y. ; alet, Doping Fluorine: A Feasible Solution to Enhancing the Conductivity of High-Resistance Wide Bandgap Mg_{0.51}Zn_{0.49}O Active Components. *Sci. Rep.* 2015, 5 (1), 15516.
- [30] Hou Y. ; Mei Z. ; Liu Z. ; alet, MgZnO Based Ultraviolet Photodetector with High Photoresponsivity Achieved by Fluorine Doping. *Thin Solid Films* 2017, 634, 165 - 168.
- [31] Liang H. ; Mei Z. ; Ye D. ; alet, Dual-Functional Crystalline BeO Layer in Enhancement-Mode ZnO/Si Thin Film Transistors; Dual-Functional Crystalline BeO Layer in ZnO/Si TFTs. *Phys. Status Solidi RRL* 2017, 11 (5), 1600443.
- [32] Liang H. L. ; Mei Z. X. ; Zhang Q. H. ; alet, Interface Engineering of High-Mg-Content MgZnO/BeO/Si for p-n Heterojunction Solar-Blind Ultraviolet Photodetectors. *Appl. Phys. Lett.* 2011, 98 (22), 221902.
- [33] Hou Y. N. ; Mei Z. X. ; Liang H. L. ; alet, Dual-Band MgZnO Ultraviolet Photodetector Integrated with Si. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102 (15), 153510.
- [34] Zheng Q. ; Huang F. ; Ding K. ; alet, MgZnO-Based Metal-Semiconductor-Metal Solar-Blind Photodetectors on ZnO Substrates. *Appl. Phys. Lett.* 2011, 98 (22), 221112.
- [35] Liang H. L. ; Mei Z. X. ; Hou Y. N. ; alet, Realization of W - MgZnO Epitaxial Growth on BeO-Buffered ZnO for UV-B Photodetectors. *J. Crys. Growth* 2013, 381, 6 - 9.
- [36] Zheng Q. ; Huang F. ; Huang J. ; alet, High-Responsivity Solar-Blind Photodetector Based on Mg_{0.46}Zn_{0.54}O Thin Film. *IEEE Electron Device Lett.* 2012, 33 (7), 1033 - 1035.
- [37] Ju Zhen-gang, Zhang Ji-ying, Jiang Da-yong, alet, The Growth of MgZnO Thin Film by MOCVD and the Application in Solar Blind UV Detector, *Chinese Journal of Luminescence* 2008, 29 (5), 865 (in Chinese). 鞠振刚, 张吉英, 蒋大勇, 等, MOCVD 生长 MgZnO 薄膜及太阳盲紫外光电探测, *发光学报* 2008, 29 (5), 865。
- [38] Wang L. K. ; Ju Z. G. ; Zhang J. Y. ; alet, Single-Crystalline Cubic MgZnO Films and Their Application in Deep-Ultraviolet Optoelectronic Devices. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 95 (13), 131113.
- [39] Liang H. L. ; Mei Z. X. ; Liu Z. L. ; alet, High Zn Content Single-Phase RS-MgZnO Suitable for Solar-Blind Frequency Applications; (Strasbourg, France), *ConfAIP. Proc.* 2010, 1292, 185 - 190.
- [40] Liang H. L. ; Mei Z. X. ; Liu Z. L. ; alet, Growth of Single-Phase Mg_{0.3}Zn_{0.7}O Films Suitable for Solar-Blind Optical De-

- vices on RS-MgO Substrates. *Thin Solid Films* 2012, 520 (6), 1705 – 1708.
- [41] Xie X. ; Zhang Z. ; Li B. ; alet, Enhanced Solar-Blind Responsivity of Photodetectors Based on Cubic MgZnO Films via Gallium Doping. *Opt. Express* 2014, 22 (1), 246.
- [42] Xie X. ; Zhang Z. ; Li B. ; alet, Ultra-Low Threshold Avalanche Gain from Solar-Blind Photodetector Based on Graded-Band-Gap-Cubic-MgZnO. *Opt. Express* 2015, 23 (25), 32329.
- [43] Casey Boutwell, R. ; Wei, M. ; Schoenfeld, W. V. The Effect of Oxygen Flow Rate and Radio Frequency Plasma Power on Cubic ZnMgO Ultraviolet Sensors Grown by Plasma-Enhanced Molecular Beam Epitaxy. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 103 (3), 031114.
- [44] Fan M. M. ; Liu K. W. ; Zhang Z. Z. ; alet, High-Performance Solar-Blind Ultraviolet Photodetector Based on Mixed-Phase ZnMgO Thin Film. *Appl. Phys. Lett.* 2014, 105 (1), 011117.
- [45] Han S. ; Liu S. M. ; Lu Y. M. ; alet, High Performance Solar-Blind Ultraviolet Photo Detector Based on Mixed-Phase MgZnO Thin Film with Different Interfaces Deposited by PLD Method. *Journal of Alloys and Compounds* 2017, 694, 168 – 174.
- [46] Liu L. ; Mei Z. ; Tang A. ; alet, VacanciesOxygen: The Origin of n-Type Conductivity in ZnO. *Phys. Rev. B* 2016, 93, 235305.
- [47] Nomura K. ; Ohta H. ; Takagi A. ; alet, Room-Temperature Fabrication of Transparent Flexible Thin-Film Transistors Using Amorphous Oxide Semiconductors. *Nature* 2004, 432 (7016), 488 – 492.
- [48] Nagarajan L. ; De Souza R. A. ; Samuelis D. ; alet, Chemically Driven Insulator – Metal Transition in Non-Stoichiometric and Amorphous Gallium Oxide. *Nat. Mater* 2008, 7 (5), 391 – 398.
- [49] Chen Y. ; Lu Y. ; Liao M. ; alet, 3D Solar-Blind Ga₂O₃ Photodetector Array Realized Via Origami Method. *Adv. Funct. Mater.* 2019, 29 (50), 1906040.
- [50] Zhou H. ; Cong L. ; Ma J. ; alet, High Gain Broadband Photoconductor Based on Amorphous Ga₂O₃ and Suppression of Persistent Photoconductivity. *J. Mater. Chem. C* 2019, 7 (42), 13149 – 13155.
- [51] Han Z. ; Liang H. ; Huo W. ; alet, Boosted UV Photodetection Performance in Chemically Etched Amorphous Ga₂O₃ Thin-Film Transistors. *Adv. Optical Mater.* 2020, 8 (8), 1901833.
- [52] Wang Y. ; Cui W. ; Yu J. ; alet, One-Step Growth of Amorphous/Crystalline Ga₂O₃ Phase Junctions for High-Performance Solar-Blind Photodetection. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11 (49), 45922 – 45929.
- [53] Polyakov A. Y. ; Yakimov E. B. ; Shchemerov I. V. ; alet, Huge Photosensitivity Gain Combined with Long Photocurrent Decay Times in Various Polymorphs of Ga₂O₃: Effects of Carrier Trapping with Deep Centers. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2025, 58 (6), 063002.
- [54] Hu S. ; Han D. ; Jiang K. ; alet, Influence of Oxygen Vacancy and Metal – Semiconductor Contact on the Device Performance of Amorphous Gallium Oxide Photodetectors. *Appl. Phys. Express* 2023, 16 (2), 021005.
- [55] Zhu Rui, Liang Huili, Bai He, alet, Double Is Better: Achieving an Oxide Solar-Blind UV Detector with Ultrahigh Detectivity and Fast-Refreshing Capability. *Appl. Mater. Today* 2022, 29 101556.
- [56] Han Z. ; Song S. ; Liang H. ; alet, IGZO/GaHigh-Performance₂O₃ Dual-Active-Layer Thin Film Transistor for Deep UV Detection. *Appl. Phys. Lett.* 2022, 120 (26), 262102.
- [57] Huang H. ; Xing H. ; Zhang W. ; alet, Hetero-Interface Boosted High-Performance a-Ga₂O₃ Thin-Film Phototransistors. *Appl. Surf. Sci.* 2025, 679, 161179.
- [58] Qin Y. ; Li L. ; Yu Z. ; alet, Ultra-High Performance Amorphous Ga₂O₃ Photodetector Arrays for Solar-Blind Imaging. *Adv. Sci.* 2021, 2101106.
- [59] Chen Y. ; Han S. ; Yue D. ; alet, UV Response Characteristics of Amorphous Ga₂O₃ Thin Films with Different Microatom Distributions and a Low-Temperature Fabricated Ultrahigh-Performance a-Ga₂O₃ UV Detector. *ACS Photonics* 2024, 11, 985–999.
- [60] Sui Y. ; Liang H. ; Huo W. ; alet, Flexible UV Detectors Based on In-Situ Hydrogen Doped Amorphous Ga₂O₃ with High Photo-to-Dark Current Ratio. *Mater. Futures* 2024, 3 (1), 015701.
- [61] Liu Y. ; Qin H. ; Peng C. ; alet, Boosting the Responsivity of Amorphous-Ga₂O₃ Solar-Blind Photodetector via Organosilicon Surface Passivation. *Appl. Phys. Lett.* 2024 124, 082102.
- [62] Rong J. ; Liang H. ; Zhu R. ; alet, Mixed-Dimensional 2D PtSe₂/3D a-Ga₂O₃ Heterojunction for Self-Driven Broadband

- Photodetector with High Responsivity in UV Region. *Phys. Status Solidi A* 2024, 2400006.
- [63] Zhang J. ; Liu F. ; Liu D. ; alet, Toward Smart Flexible Self-Powered near-UV Photodetector of Amorphous Ga₂O₃ Nanosheet. *Materials Today Physics* 2023, 31, 100997.
- [64] Dan Zhang; Zhou X. ; Xiong Y. ; alet, Flexible Self-Powered Solar-Blind UV Photodetectors Based on Amorphous Ga₂O₃ Modified Carbon Fiber Cloth. *Journal of Alloys and Compounds* 2023, 969, 172483.
- [65] Varshney U. ; Sharma A. ; Singh P. ; alet, Revealing the Photo-Sensing Capabilities of a Super-Flexible, Paper-Based Wearable a-Ga₂O₃ Self-Driven Ultra-High-Performance Solar-Blind Photodetector. *Chemical Engineering Journal* 2024, 496, 153910.
- [66] Zhao Kai, Yang Juehan, Wang Pan, alet, β -Ga₂O₃ Nanoribbon with Ultra-High Solar-Blind Ultraviolet Polarization Ratio. *Adv. Mater.* 2024, 2406559.
- [67] Zhang Y. ; Liang H. ; Xing F. ; alet, Strain-Enhanced Polarization Sensitivity in β -Ga₂O₃ Photodetector. *China-Phys. Mech. Astron.* 2024, 67 (4) 247312.
- [68] Zhang Y. ; Zhang Y. ; Liang H. ; alet, Enabling DUV Polarization Detection with Isotropic Amorphous Gallium Oxide. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2024.
- [69] Zhu R. ; Liang H. ; Hu S. ; alet, Amorphous-Ga₂O₃ Optoelectronic Synapses with Ultra-low Energy Consumption. 2021, 9 2100741.
- [70] Zhang Z. ; Zhao X. ; Zhang X. ; alet, In-Sensor Reservoir Computing System for Latent Fingerprint Recognition with Deep Ultraviolet Photo-Synapses and Memristor Array. *Nat. Commun.* 2022, 13 (1), 6590.
- [71] Yuan J. ; Wu C. ; Wang S. ; alet, Enhancing Plasticity in Optoelectronic Artificial Synapses: A Pathway to Efficient Neuromorphic Computing. *Appl. Phys. Lett.* 2024, 124 (2), 021101.
- [72] Zhu Rui, Liang Huili, Liu Shangfeng, alet, Non-Volatile Optoelectronic Memory Based on a Photosensitive Dielectric. *Nat. Commun.* 2023, 14, 5396.
- [73] Qiao B. ; Zhang Z. ; Xie X. ; alet, Avalanche Gain in Metal - Semiconductor - Metal Ga₂O₃ Solar-Blind Photodiodes. *J. Phys. Chem. C* 2019, 123 (30), 18516 - 18520.
- [74] Zhang Q. ; Li N. ; Zhang T. ; alet, Enhanced Gain and Detectivity of Unipolar Barrier Solar Blind Avalanche Photodetector via Lattice and Band Engineering. *Nat Commun* 2023, 14 (1), 418.



梁会力(1984-),女,河北无极人,博士,副研究员,2012年于中科院物理研究所获得博士学位,主要从事宽禁带氧化物半导体光电探测材料与器件研究。

E-mail:hlliang@iphy. ac. cn



梅增霞(1975-),女,河南新蔡人,博士,研究员,2005年于中科院物理研究所获得博士学位,主要从事氧化物半导体材料与器件研究。

E-mail:zxmei@iphy. ac. cn