



## 氧化镓微晶薄膜制备及其日盲深紫外探测器

赖黎, 莫慧兰, 符思婕, 毛彦琦, 王加恒, 范嗣强

引用本文:

赖黎, 莫慧兰, 符思婕, 等. 氧化镓微晶薄膜制备及其日盲深紫外探测器[J]. *发光学报*, 2020, 41(9): 1165–1171.

LAI Li, MO Hui-lan, FU Si-jie, et al. Preparation of Gallium Oxide Microcrystalline Thin Films and Its Solar Blind DUV Photodetector[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(9): 1165–1171.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/fgxb20204109.1165>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 氧化镓薄膜的制备及其日盲紫外探测性能研究

Preparation and Ultraviolet Detection Performance of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thin Films

*发光学报*. 2015(8): 906–911 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153608.0906>

### m面蓝宝石上外延(110)取向立方MgZnO薄膜及其日盲紫外探测器件研究

Epitaxial (110)-oriented Cubic MgZnO Films on m-plane Sapphire for Solar-blind UV Photodetectors

*发光学报*. 2014, 35(6): 678–683 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143506.0678>

### 不同钝化结构对非极性AlGaIn-MSM紫外探测器性能的提升

Performance Enhancement of Nonpolar AlGaIn-MSM Ultraviolet Photodetectors by Different Passivation Layers

*发光学报*. 2018, 39(7): 997–1001 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183907.0997>

### ZnO单晶和BeZnO合金的生长及其紫外探测器研究

Growth of ZnO Single Crystal and BeZnO Alloy and Ultraviolet Detector

*发光学报*. 2015, 36(11): 1233–1239 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153611.1233>

### 退火对Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜特性的影响

Effect of Annealing on Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Film

*发光学报*. 2017, 38(5): 606–610 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173805.0606>

文章编号: 1000-7032(2020)09-1165-07

## 氧化镓微晶薄膜制备及其日盲深紫外探测器

赖 黎, 莫慧兰, 符思婕, 毛彦琦, 王加恒, 范嗣强\*

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

**摘要:** 采用射频磁控溅射技术和热退火技术在石英衬底上制备了微晶态  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、拉曼光谱 (Raman)、紫外-可见-红外分光光度计 (UV-Vis-IR) 以及 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 等手段对薄膜结构、光学特性以及化学组分进行了系统研究。结果表明, 制备的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜呈非晶态, 退火处理后, 薄膜由非晶态转变为含  $\beta$  相  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  的微晶薄膜, 随退火温度升高, 薄膜内部微晶成分不断增加, 但最终在石英衬底上制备的薄膜并未全部转换成全晶态薄膜 ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ )。基于非晶和微晶  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜制备了金属-半导体-金属 (MSM) 结构的日盲深紫外探测器, 发现非晶  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜基器件表现出更高的光响应, 而微晶  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜基器件则具有更低的暗电流和更快的响应速度。

**关键词:** 氧化镓; 微晶; 光电性能; 日盲紫外探测器

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/fgxb20204109.1165

## Preparation of Gallium Oxide Microcrystalline Thin Films and Its Solar Blind DUV Photodetector

LAI Li, MO Hui-lan, FU Si-jie, MAO Yan-qi, WANG Jia-heng, FAN Si-qiang\*

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

\* Corresponding Author, E-mail: mikefan111@163.com

**Abstract:** Microcrystalline  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films were prepared on quartz substrates by radio frequency magnetron sputtering technology and thermal annealing technology. Using X-ray diffractometer (XRD), Raman spectroscopy, ultraviolet-visible-infrared spectrophotometer (UV-Vis-IR) and X-ray photoelectron spectrometer (XPS), the structure, optical properties and the chemical components were systematically studied. The results show that the prepared  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  film is amorphous. After the post-annealing process, all the films are changed from amorphous to microcrystalline films containing  $\beta$ -phase  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . With the rising of annealing temperature, the microcrystalline composition inside the film continues to increase. However, not all the thin films prepared on the quartz substrate were converted into fully crystalline thin films ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ). Based on amorphous and microcrystalline  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films, metal-semiconductor-metal (MSM) structured solar blind deep ultraviolet photodetectors were fabricated. It was found that amorphous  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin film-based device shows higher optical response, while microcrystalline  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin film-based device shows lower dark current and faster response speed.

**Key words:** gallium oxide; microcrystalline; photoelectric performance; solar blind UV photodetector

收稿日期: 2020-05-26; 修订日期: 2020-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(11904041); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201900542, KJ160031)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China(11904041); Scientific and Technological Research Foundation of Chongqing Municipal Education Commission(KJQN201900542, KJ160031)

## 1 引 言

日盲探测器是指仅仅在深紫外波段(低于 280 nm)具有极强感知能力的探测器,由于臭氧层的吸收,日盲波段(200 ~ 280 nm)的紫外光在大气中几乎不存在,因此工作于该波段的光电探测器具有高预警率的特点。基于此,日盲探测器广泛应用于导弹预警、安全通信、臭氧洞检测、紫外天文学、火灾监测、化学/生物分析等领域。目前,可用于制造日盲探测器的材料主要是超宽带隙半导体材料( $E_g > 4.2$  eV),其中研究较多的有 ZnMgO、AlGaIn、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等<sup>[1-2]</sup>。然而,要获得高质量的合金薄膜异常困难,例如,AlGaIn 薄膜需要极高的温度且难以形成外延膜,ZnMgO 在常规结构下难以保持超过 4.5 eV 的带宽<sup>[3]</sup>。

氧化镓(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)属于直接超宽带隙(4.8 ~ 5.2 eV)半导体材料,具有较高的介电常数、热稳定性和化学稳定性,使其在日盲紫外具有极大的应用前景<sup>[4-6]</sup>。目前用于制备日盲探测器的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料主要有  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体、晶体外延薄膜和纳米结构等<sup>[7-8]</sup>,其中薄膜型器件因其制备方便而被广泛应用。然而,通常所制备的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜呈现非晶态,要实现晶体需要通过后期退火处理。尽管如此,人们发现采用非晶态 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜所制备的日盲紫外探测器也具有较好的性能。例如,Zhang 等最近报道了一种基于通过氧通量制备的非晶态氧化镓薄膜的高响应日盲紫外探测器<sup>[9]</sup>;Cui 等报道了一种基于室温合成的非晶态 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的柔性基板上的高响应日盲紫外探测器<sup>[10]</sup>。对于 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体,Guo 等通过 Zn 掺杂调控  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜氧空位缺陷,并制备了具有较低暗电流和较高响应速度的日盲紫外探测器<sup>[11]</sup>。因此,基于非晶态及晶体 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料可制备高性能的日盲紫外探测器。然而,由于材料生长过程中引入的缺陷态对光生载流子的捕获会使器件在光开关关闭后仍存在残余光响应电流(即持续光电导现象),从而降低器件的响应速度。通常情况下,Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体材料由于较低的缺陷态密度,其器件响应速度普遍较高<sup>[12-13]</sup>。研究表明,非晶 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜通过后期退火形成  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微晶时,薄膜不仅结晶质量明显提高,且应用于日盲紫外探测器时器件具有较高的光电性能<sup>[14-16]</sup>。此外,

目前报道的多数高性能 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜日盲探测器主要基于蓝宝石衬底,而采用石英衬底沉积 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜用于日盲探测器的报道相对较少<sup>[17-19]</sup>。因此,研究基于石英衬底沉积含有  $\beta$  相 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体成分的高质量微晶薄膜,并将其用于制备高响应速度的日盲探测器具有重要意义。

基于此,本工作首先通过射频磁控溅射在石英衬底上成功制备了非晶态 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,并通过后期退火获得了具有  $\beta$  相 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的微晶薄膜。采用 XRD、Raman、XPS 等手段对所有薄膜的结构及光学特性进行了表征。选取非晶及含有  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的微晶薄膜制备了 MSM 型日盲紫外探测器,对器件光电性能表征发现器件具有较低的暗电流和较快的响应速度。

## 2 实 验

实验采用射频磁控溅射在石英衬底上沉积非晶态 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。高纯 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 靶(99.99%)作为溅射靶材,溅射腔体本地真空度为  $5 \times 10^{-4}$  Pa、溅射 Ar 气压和溅射时间分别为 2.0 Pa 和 90 min。最后,将沉积的薄膜置于 BTF-1200C BEQ 管式炉中,在 500,700,900 °C 温度条件下 Ar 环境中退火 2 h,将未退火及不同温度退火的薄膜样品分别标记为 A、B、C 和 D。

薄膜结构特性通过 Cu K $\alpha$ 1 辐射的 XRD 进行表征(Bruker D8 ADVANCE A25X),采用紫外-可见分光光度计检测薄膜的光学透射率及光吸收特性。拉曼散射谱通过 Horiba HR Evolution 光谱仪进行表征。薄膜的化学组分由 X 射线光电子能谱(XPS, ESCALAB250)在室温下测试。采用 Keithley 2450 源表测试基于 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的日盲紫外探测器的  $I$ - $V$  曲线和时间依赖性光响应特性,其中 254 nm 深紫外光由 6 W 紫外灯提供。

## 3 测试过程及结果分析

图 1(a) 为不同温度退火的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的 XRD 谱。可以看到,未退火的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜(A)除衬底外未发现其他衍射峰,表明在石英衬底上制备的  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为非晶态,经过退火后,薄膜在  $\sim 30^\circ$  处出现微弱的衍射峰,这与  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的(400)面相匹配(PDF# 43-1012)<sup>[20]</sup>。此外,随着退火温度升高,该衍射峰强度逐渐增强,表明薄膜内部出

现的 $\beta$ 相 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 微晶含量逐渐增加,结晶质量得到改善。

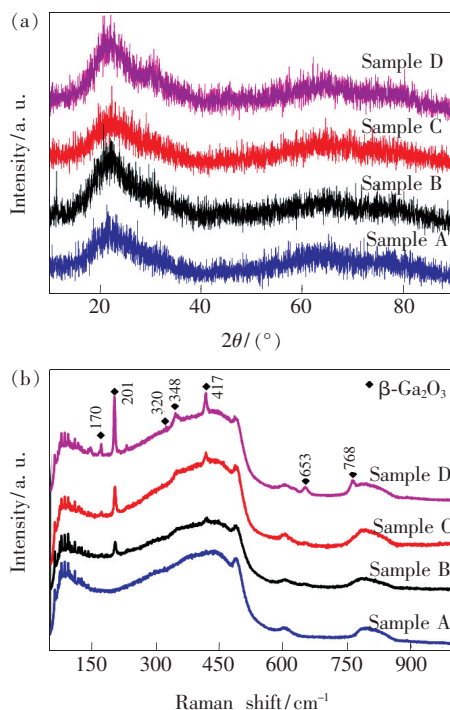


图1 (a)不同温度退火 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的XRD谱;(b)不同温度退火 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的Raman谱。

Fig. 1 (a)XRD spectra of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  film at different annealing temperature. (b)Raman spectra of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  film at different annealing temperature.

为了进一步验证 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的晶体结构,对所有薄膜进行Raman光谱检测,结果如图1(b)所示。对于未退火的非晶态 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜,除衬底外未发现其他散射峰;类似地,薄膜经过退火后,分别在170,201,320,348,417,653,768 $\text{cm}^{-1}$ 波数位置出现明显散射峰,均为 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的典型Raman振荡模式<sup>[21-22]</sup>。而 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的Raman散射峰可分为三类:低于300 $\text{cm}^{-1}$ 的低频模(170,201 $\text{cm}^{-1}$ )由 $\text{GaO}_4$ 四面体/ $\text{GaO}_6$ 八面体链的平移与振动引起,300~500 $\text{cm}^{-1}$ 的中频模(320,348,417 $\text{cm}^{-1}$ )与 $\text{GaO}_6$ 八面体的形变有关,高于500 $\text{cm}^{-1}$ 的高频模(653,768 $\text{cm}^{-1}$ )与 $\text{GaO}_4$ 四面体的弯曲和拉伸有关<sup>[23-24]</sup>。另外,可以看到 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的振荡模式随着退火温度的升高逐渐变强,进一步表明薄膜结晶质量得到改善,同时表明薄膜内部 $\beta$ 相 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 微晶成分含量逐渐增加,这与XRD分析结果一致。

图2显示了不同温度退火 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的透射光

谱。可以看到,所有薄膜在紫外-可见区域(300~800 nm)的平均透射率超过80%,同时薄膜具有明显的干涉现象,表明制备的 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜具有较高的界面质量。此外,薄膜在~250 nm处存在陡峭的吸收边,并且退火后出现明显蓝移现象。众所周知,对于直接带隙半导体材料,其禁带宽度( $E_g$ )可通过下列公式计算得出<sup>[25-27]</sup>:

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

其中 $\alpha$ 为吸收系数, $h\nu$ 为入射光子能量, $A$ 为常数。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的禁带宽度可以通过外推 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 关系的线性区域得到。计算得出未退火及退火后 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的禁带宽度 $E_g$ 分别为4.74, 4.84, 4.80, 4.81 eV,如图2插图所示。可以看到,与未退火薄膜相比,经过退火后的 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜禁带宽度明显变大。薄膜带隙的变大可归因于薄膜结构缺陷的减少和结晶度的改善,而带电缺陷、残余应力和不均匀的微观结构引起的内部电场也可导致薄膜带隙发生变化<sup>[28-30]</sup>。

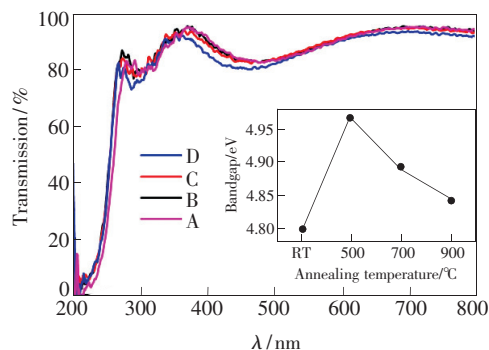


图2 不同温度退火 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的透射光谱,插图为对应的薄膜带隙变化。

Fig. 2 Transmission spectra of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  film at different annealing temperature, cutline is corresponding film band gap change.

为了检测退火后 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜内的化学组态,测试了900 $^{\circ}\text{C}$ 高温退火 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的XPS谱。图3(a)~(c)分别为XPS全谱、Ga 2p和O 1s能级谱。为了减少测试样品表面的污染程度,在测试之前将薄膜表面用Ar等离子体刻蚀60 s,采用C 1s标准峰284.6 eV对所有谱线进行校准。薄膜在室温下的XPS全谱如图3(a)所示,其中检测到Ga 3d、Ga 3p、Ga 3s、C 1s、Ga LMM、O 1s、O KLL和Ga 2p信号峰。薄膜表面有机物的吸附是C 1s信号的主要来源<sup>[31-32]</sup>。如图3(b),可以观察到两个结合能分别为1118.15 eV和1145.0



eV 的信号峰,分别对应于 Ga 2p<sub>3/2</sub> 和 Ga 2p<sub>1/2</sub> 核心能级,且与 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中的 Ga—O 键有关<sup>[33-34]</sup>。而位于 530.4 eV 的 O 1s 峰如图 3(c) 所示,对应于 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶格位的氧,同时 O 1s 谱表现出较好的单峰对称性<sup>[10,35]</sup>。

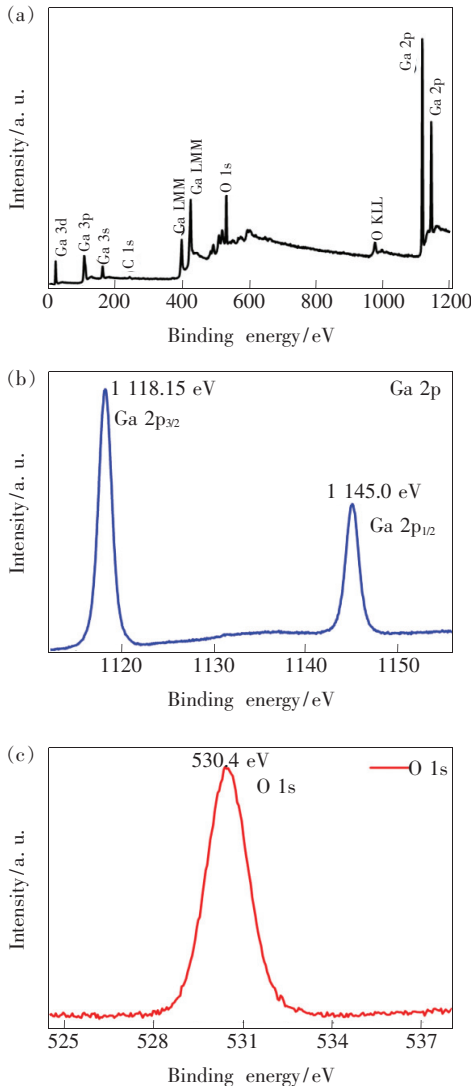


图 3 900 °C 退火 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的 XPS 谱。(a) 全谱; (b) Ga 2p 能级谱; (c) O 1s 谱。

Fig. 3 XPS spectra of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film at 900 °C annealing temperature. (a) Full spectrum. (b) Ga 2p energy spectrum. (c) O 1s spectrum.

为了研究基于未退火和退火 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜日盲紫外探测器的日盲光电特性,分别在未退火(A)和 900 °C 退火(D)薄膜样品表面镀三对 Ti/Au 叉指电极,制备了 MSM 光电探测器。如图 4(a) ~ (b) 所示, *I-V* 曲线表现出明显的背靠背整流特性,同时,随着光照强度增大,两个器件的光电流逐渐增加。与 900 °C 退火薄膜器件相比,未退火

薄膜制备的器件具有更高的光电流,表明高温退火形成的 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体能抑制与缺陷相关的器件增益机制导致的载流子倍增<sup>[36]</sup>。此外,未退火与 900 °C 退火薄膜器件的暗电流分别为 7.56 nA 和 0.74 nA,可以看到,与未退火薄膜器件相比,900 °C 退火 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜器件具有更低暗电流,这与高温退火后薄膜内形成的 β 相 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微晶有关。由于退火后形成了 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体,薄膜缺陷态减少,这使得缺陷态对载流子的捕获减少,因此器件表现出更低暗电流<sup>[36-38]</sup>。相比之下,900 °C 退火薄膜的日盲探测器在 10 V 偏压下对 365 光照几乎无响应,光电流为 nA 级别,表明该器件具有更好的日盲特性及光谱选择性。响应率(*R*)定义为光电探测器有效面积上的入射光单位功率产生的光电流( $R = I_1 - I_d / PS$ ), *I*<sub>1</sub> 和 *I*<sub>d</sub> 分别为光电流和暗电流, *P* 为入射光功率密度, *S* 为器件有效面积<sup>[36]</sup>。本文中器件有效面积 *S* 为 0.03 cm<sup>2</sup>, 计算了两个器件在 10 V 偏压, 254 nm 光照(500 μW/cm<sup>2</sup>) 条件下的器件响应率, 基于未退火及 900 °C 退火薄膜的器件 *R* 分别为 58.63 mA/W 和 2.72 mA/W。未退火薄膜器件的响应率 *R* 明显高于 900 °C 退火薄膜器件, 表明未退火 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜器件存在较大与缺陷相关的内部增益机制。

此外,时间依赖性曲线可以用来检测分析器件对紫外光照的响应速度。如图 4(c) ~ (d) 所示,对于未退火及 900 °C 退火的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜器件,随着 254 nm 光照强度增加,器件光响应电流逐渐变大,结合 *I-V* 曲线,表明两个器件都具有良好的日盲特性及光谱选择性,基于 900 °C 退火薄膜的日盲探测器更优。由于光电探测器的光响应时间通常被用来反映器件的响应速度,其中光响应上升时间(*t*<sub>on</sub>) 定义为当光照打开时光电流从峰值的 10% 上升到峰值的 90% 所用的时间,衰减时间(*t*<sub>off</sub>) 定义为光照结束后光电流从峰值的 90% 下降到峰值的 10% 所用的时间<sup>[38-40]</sup>。图 4(e)、(f) 分别为基于未退火和 900 °C 退火薄膜器件时间依赖性曲线的局部放大图,其对应器件的上升时间/衰减时间分别为 3.20 s/0.23 s 和 1.47 s/0.11 s。值得注意的是,与未退火薄膜相比,基于 900 °C 退火薄膜的日盲探测器的响应时间明显降低,即器件的响应速度变快。由 XRD 和 Raman 分析可知,随着薄膜退火温度升高, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜内出现 β 相 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微晶成分,同时薄膜结晶质量得到改善,

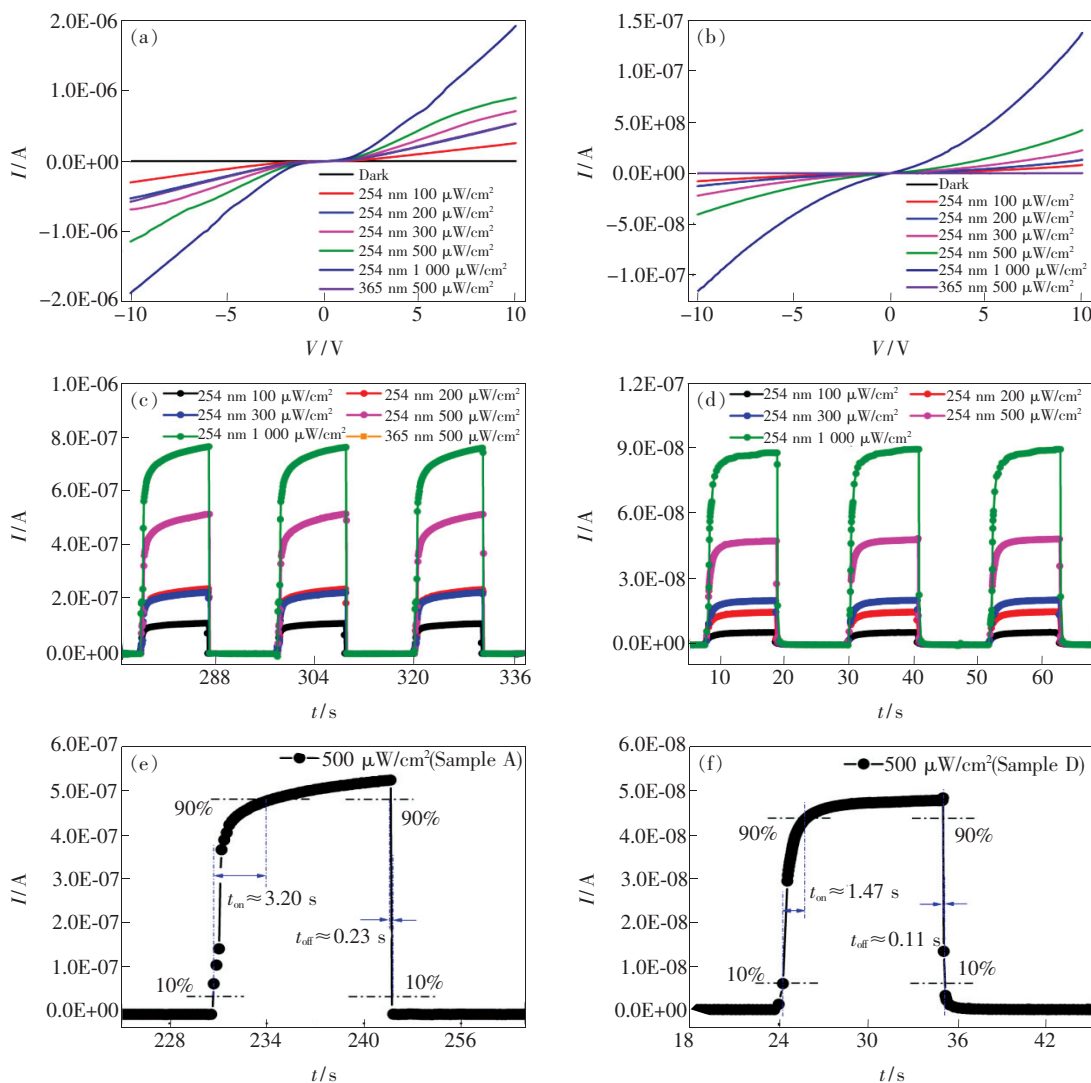


图 4 10 V 偏压下基于未退火和 900 °C 退火 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜日盲探测器在 254 nm 光照下的 *I*-*V* 特性曲线((a) ~ (b))及电流时间响应曲线((c) ~ (d));(e) ~ (f)分别为器件在 254 nm(500 μW/cm<sup>2</sup>)光照下的局部放大图。

Fig. 4 (a) - (b) *I*-*V* characteristics of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film solar blind detector unannealed and annealed on 900 °C under 10 V bias voltage. (c) - (d) Time response curves of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film solar blind detector unannealed and annealed on 900 °C under 10 V bias voltage. (e) - (f) Partial enlarged drawings of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film solar blind detector under 254 nm(500 μW/cm<sup>2</sup>) illumination.

这会使得薄膜内部与缺陷相关的捕获态数目减少。因此,当用日盲光照射探测器时会导致缺陷态对载流子的俘获作用减弱,从而器件的响应速度变快<sup>[36,41]</sup>。结果表明,微晶 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的存在对于提高 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜日盲探测器的光响应速度具有重要作用。

### 4 结 论

本文采用射频磁控溅射和热退火技术在石英衬底上制备了微晶 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。采用 XRD、Ra-

man、紫外-可见分光光度计和 XPS 对薄膜的结构及光学特性进行了系统研究。结果表明,制备的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜呈现非晶态,随着退火温度升高,薄膜由非晶态逐渐转变为 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体薄膜,同时 β 相 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微晶成分逐渐增加。基于非晶和微晶 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜分别制备了 MSM 型日盲深紫外探测器,发现非晶 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜基器件表现出更高的光响应,而微晶 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜基器件则具有更低的暗电流和更快的响应速度(0.11 s),器件具有较高的日盲光电特性。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] XU M S, GE L, HAN M M, *et al.*. Recent advances in Ga-based solar-blind photodetectors [J]. *Chin. Phys. B*, 2019, 28(2):028502-1-9.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] CHEN X H, REN F F, GU S L, *et al.*. Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(4):381-415.
- [ 4 ] SASAKI K, HIGASHIWAKI M, KURAMATA A, *et al.*. Si-ion implantation doping in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and its application to fabrication of low-resistance ohmic contacts [J]. *Appl. Phys. Express*, 2013, 6(8):086502.
- [ 5 ] TIPPINS H H. Optical absorption and photoconductivity in the band edge of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. *Phys. Rev.*, 1965, 140(1A):A316-A319.
- [ 6 ] HIGASHIWAKI M, SASAKI K, KURAMATA A, *et al.*. Gallium oxide (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(010) substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(1):013504-1-3.
- [ 7 ] RAFIQUE S, KARIM M R, JOHNSON J M, *et al.*. LPCVD homoepitaxy of Si doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on (010) and (001) substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112(5):052104-1-5.
- [ 8 ] BALDINI M, ALBRECHT M, FIEDLER A, *et al.*. Semiconducting Sn-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> homoepitaxial layers grown by metal organic vapour-phase epitaxy [J]. *J. Mater. Sci.*, 2016, 51(7):3650-3656.
- [ 9 ] ZHANG Y F, CHEN X H, XU Y, *et al.*. Transition of photoconductive and photovoltaic operation modes in amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based solar-blind detectors tuned by oxygen vacancies [J]. *Chin. Phys. B*, 2019, 28(2):028501-1-6.
- [ 10 ] CUI S J, MEI Z X, ZHANG Y H, *et al.*. Room-temperature fabricated amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> high-response-speed solar-blind photodetector on rigid and flexible substrates [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(19):1700454-1-9.
- [ 11 ] GUO D Y, QIN X Y, LV M, *et al.*. Decrease of oxygen vacancy by Zn-doped for improving solar-blind photoelectric performance in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films [J]. *Electron. Mater. Lett.*, 2017, 13(6):483-488.
- [ 12 ] CHEN X H, MU W X, XU Y, *et al.*. Highly narrow-band polarization-sensitive solar-blind photodetectors based on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(7):7131-7137.
- [ 13 ] LI K H, ALFARAJ N, KANG C H, *et al.*. Deep-ultraviolet photodetection using single-crystalline  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiO heterojunctions [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(38):35095-35104.
- [ 14 ] FENG Z Q, HUANG L, FENG Q, *et al.*. Influence of annealing atmosphere on the performance of a  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film and photodetector [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(8):2229-2237.
- [ 15 ] RAFIQUE S, HAN L, ZHAO H P. Thermal annealing effect on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film solar blind photodetector heteroepitaxially grown on sapphire substrate [J]. *Phys. Status Solidi (A)*, 2017, 214(8):1700063-1-6.
- [ 16 ] ZHANG H, DENG J X, KONG L, *et al.*. Effect of annealing atmosphere on the structural and optical properties of the Nb-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films [J]. *Micro Nano Lett.*, 2019, 14(1):62-65.
- [ 17 ] HAN S, HUANG X L, FANG M Z, *et al.*. High-performance UV detectors based on room-temperature deposited amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films by RF magnetron sputtering [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(38):11834-11844.
- [ 18 ] CUI S J, MEI Z X, HOU Y N, *et al.*. Enhanced photoresponse performance in Ga/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. *Chin. Phys. B*, 2018, 27(6):067301.
- [ 19 ] KUMAR N, ARORA K, KUMAR M. High performance, flexible and room temperature grown amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind photodetector with amorphous indium-zinc-oxide transparent conducting electrodes [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, 52(33):335103.
- [ 20 ] LI J, CHEN X H, MA T C, *et al.*. Identification and modulation of electronic band structures of single-phase  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alloys grown by laser molecular beam epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113(4):041901.
- [ 21 ] NIKOLAEV V I, PECHNIKOV A I, STEPANOV S I, *et al.*. Epitaxial growth of  $\bar{2}01$   $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on (0001) sapphire substrates by halide vapour phase epitaxy [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2016, 47:16-19.
- [ 22 ] ONUMA T, FUJIOKA S, YAMAGUCHI T, *et al.*. Polarized Raman spectra in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals [J]. *J. Cryst. Growth*, 2014, 401:330-333.

- [23] SHEN H, YIN Y N, TIAN K, *et al.*. Growth and characterization of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films by sol-gel method for fast-response solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2018, 766:601-608.
- [24] RAO R, RAO A M, XU B, *et al.*. Blueshifted Raman scattering and its correlation with the [110] growth direction in gallium oxide nanowires [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(9):094312-1-5.
- [25] MANANDHAR S, RAMANA C V. Direct, functional relationship between structural and optical properties in titanium-incorporated gallium oxide nanocrystalline thin films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(6):061902.
- [26] HASSANIEN A M, ATTA A A, EL-NAHASS M M, *et al.*. Effect of annealing temperature on structural and optical properties of gallium oxide thin films deposited by RF-sputtering [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2020, 52(4):194-1-16.
- [27] ZHENG T, HE W, WANG L Y, *et al.*. Effect of different substrates on Si and Ta co-doped Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films prepared by pulsed laser deposition [J]. *J. Cryst. Growth*, 2020, 533:125455.
- [28] AHMED E, TOMLINSON R D, PILKINGTON R D, *et al.*. Significance of substrate temperature on the properties of flash evaporated CuIn<sub>0.75</sub>Ga<sub>0.25</sub>Se<sub>2</sub> thin films [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 335(1-2):54-58.
- [29] KAR J P, BOSE G, TULI S. Effect of annealing on DC sputtered aluminum nitride films [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2005, 198(1-3):64-67.
- [30] JOO H Y, KIM H J, KIM S J, *et al.*. Spectrophotometric analysis of aluminum nitride thin films [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A: Vac., Surf., Films*, 1999, 17(3):862-870.
- [31] WANG D, HE L N, LE Y, *et al.*. Characterization of single crystal  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films grown on SrTiO<sub>3</sub>(100) substrates by MOCVD [J]. *Ceram. Int.*, 2020, 46(4):4568-4572.
- [32] ZHANG H, DENG J X, PAN Z W, *et al.*. Structural and optical properties of Nb-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films deposited by RF magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2017, 146:93-96.
- [33] XIAO H D, MA H L, XUE C S, *et al.*. Synthesis and structural properties of beta-gallium oxide particles from gallium nitride powder [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2007, 101(1):99-102.
- [34] CHEN Z W, NISHIHAGI K, WANG X, *et al.*. Band alignment of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si heterojunction interface measured by X-ray photoelectron spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(10):102106-1-4.
- [35] XU Q J, ZHANG S Y. Fabrication and photoluminescence of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorods [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2008, 44(6):715-720.
- [36] 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.
- [37] MITRA S, PAK Y, XIN B, *et al.*. Solar-blind self-powered photodetector using solution-processed amorphous core-shell gallium oxide nanoparticles [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(42):38921-38928.
- [38] QIN Y, LONG S B, HE Q M, *et al.*. Amorphous gallium oxide-based gate-tunable high-performance thin film phototransistor for solar-blind imaging [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2019, 5(7):1900389.
- [39] WEI C T, XU J P, SHI S B, *et al.*. Self-powered visible-blind UV photodetectors based on p-NiO nanoflakes/n-ZnO nanorod arrays with an MgO interfacial layer [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(30):9369-9379.
- [40] HOU Y N, MEI Z X, LIANG H L, *et al.*. Annealing effects of Ti/Au contact on n-MgZnO/p-Si ultraviolet-B photodetectors [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2013, 60(10):3474-3477.
- [41] CARRANO J C, LI T, GRUDOWSKI P A, *et al.*. Comprehensive characterization of metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors fabricated on single-crystal GaN [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(11):6148-6160.



赖黎(1997-),女,四川绵阳人,在读本科生,主要从事宽禁带半导体材料与器件的研究。

E-mail: 759979502@qq.com



范嗣强(1978-),男,四川资阳人,博士,高级实验师,2015年于重庆大学获得博士学位,主要从事光电单元器件方面的研究。

E-mail: mikefan111@163.com