

# 在异质外延 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 单晶薄膜上实现快速响应日盲光电探测器

汤梓荧, 朱海\*

(中山大学物理学院/光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘要:** 通过等离子体辅助分子束外延(PA-MBE),在双抛蓝宝石衬底上生长出两英寸的高质量 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>单晶薄膜。利用光刻技术和电子束蒸镀金叉指电极,在薄膜上成功地制备了金属-半导体-金属结构(M-S-M)型日盲光电探测器。结果表明:日盲光电探测器的暗电流低至130 pA(20 V),对紫外波段的光响应度达到229 mA·W<sup>-1</sup>;此外,器件对光信号表现出超快的瞬态特性,衰减时间为1.31 ms,器件的优异性能可归因于 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的高结晶质量和肖特基结的巨大场迁移率。该研究为未来基于更大规模的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>异质外延薄膜的深紫外(DUV)光电探测器的应用迈出了重要一步。

**关键词:** 分子束外延;薄膜;日盲波段;光电探测器

**中图分类号:** O04

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9981(2023)03-0448-07

**引文格式:** 汤梓荧,朱海. 在异质外延 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>单晶薄膜上实现快速响应日盲光电探测器[J]. 材料研究与应用,2023,17(3): 448-454.

TANG Ziyang, ZHU Hai. High-Temporal Dynamic  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky Type Solar-Blind Photodetector via Heteroepitaxy Single Crystalline Film[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(3): 448-454.

由于深紫外(DUV)光被臭氧层强烈吸收,他在地球表面附近光强可以忽略不计<sup>[1]</sup>。因此,具有优良热稳定性和可靠性的DUV光电探测器具有较低的背景噪声,可广泛应用于军事和航空航天的高对比度光子检测。此外,深紫外线辐射对地球上的生物是有害的,如人体皮肤、两栖动物种群和农作物的进化<sup>[2-4]</sup>。由于光电倍增管的高增益而被广泛用于深紫外光检测,然而其小尺寸、高昂的费用和巨大的工作电压等特性限制了进一步应用。宽带隙半导体光电探测器是替代光电倍增管的绝佳候选者。近些年,许多研究人员对基于ZnO的紫外光电探测器进行了研究<sup>[5-6]</sup>,然而基于ZnO介质的p型掺杂仍然是一个巨大的挑战。AlGaN、AlN和金刚石等材料,也被用作制备DUV光电探测器<sup>[7-8]</sup>。对于AlGaN基光电探测器,较高晶体生长温度和晶相不可控阻碍了其应用<sup>[9-10]</sup>。对于金刚石基光电探测器,其高成本和掺杂困难是关键问题<sup>[11]</sup>。对于AlN光电探测器,其要求在真空环境中工作,波长响应波段更接近(小于)200 nm区域的波段<sup>[12-14]</sup>。

氧化镓(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)作为超宽带隙半导体之一,具有

宽带隙(5.2 eV)和极高击穿场(8 MV·cm<sup>-1</sup>)特性,是日盲波段光电探测器的有利候选者,大多数研究都集中在具有优异热力学稳定性的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>上<sup>[15-16]</sup>。目前,不同结构的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基光电探测器,如纳米带<sup>[19-20]</sup>、晶线板<sup>[21-22]</sup>和薄膜<sup>[23-25]</sup>已有相关报道。然而,大尺寸高质量 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>块状晶体的生长仍然存在各种问题,如生长坍塌引入的非故意Mg和Fe掺杂<sup>[26]</sup>。此外,大多数报道的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>光电探测器均表现出缓慢的响应时间,这是由于晶体中存在的深层缺陷造成了持续光电效应(PPC),增大了响应时间<sup>[27-28]</sup>。因此,目前研究迫切需要在在大尺寸单晶蓝宝石衬底上生长高质量的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜,为低成本制造高性能集成二维阵列日盲DUV光电探测器提供条件。

本文提出了一种复合缓冲层异质外延方法,通过PA-MBE在c面蓝宝石衬底上异质外延出高质量 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜。利用扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、原子力显微镜(AFM)、UV-VIS吸光度光谱和X射线衍射(XRD)等手段,表征 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的质量。

**收稿日期:** 2023-04-18

**作者简介:** 汤梓荧, 博士研究生, 研究方向为宽禁带半导体光电器件(包括紫外激光器、日盲探测器等), E-mail: tangzy6@mail2.sysu.edu.cn。

**通信作者:** 朱海, 博士, 教授, 研究方向为宽禁带和超宽禁带半导体外延、紫外日盲探测器件、微腔激子态激光物理研究, E-mail: zhuhai5@mail.sysu.edu.cn。

## 1 实验部分

### 1.1 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜生长和表征

#### 1.1.1 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的生长

采用PA-MBE生长 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜, $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的晶胞为单斜结构,有3种类型的氧离子,属于空间群C2/m(C<sub>2h</sub><sup>3</sup>),其结构示意图如图1所示<sup>[29]</sup>。

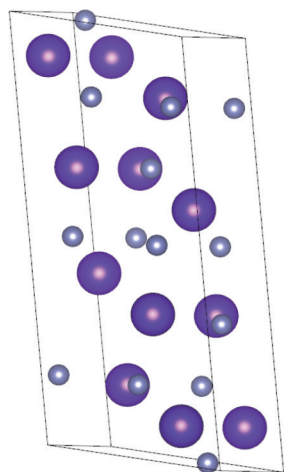


图1  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶格结构示意图

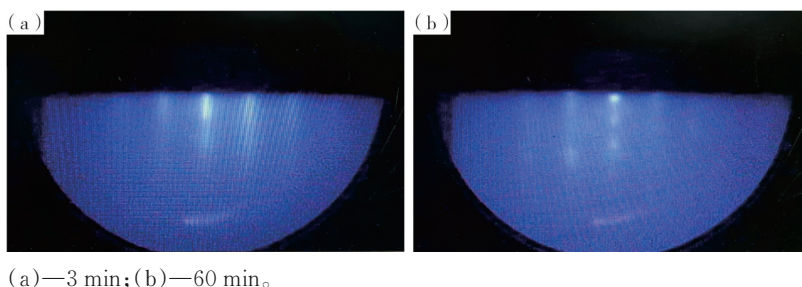
Figure 1 The crystal structure of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

将高纯度金属Ga蒸发到蓝宝石衬底上,并且插入低温GaO缓冲层,由于金属Ga原子层固有的延展性可释放界面的应变,而低温GaO插入层起着成核点的作用。在生长过程中分别提供高纯的O束源和Ga束源,其中O原子通量是大于Ga原子通量的。在富氧生长气氛中可以抑制亚氧化物Ga<sub>2</sub>O的形成,从而降低基底表面GaO<sub>x</sub>的分解速率<sup>[30-31]</sup>。在Ga源炉为950℃和衬底温度为700℃,以及380 W的射频功率和1.8 mL·min<sup>-1</sup>的O<sub>2</sub>通量条件下生长薄膜2 h,获得了厚度为250 nm的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜。

#### 1.1.2 表征方法

为了实时监测晶体生长过程中的质量,还进行了反射高能电子衍射(RHEED)图谱测试,结果如图2所示。从图2可见,存在明显的衍射条纹,证实了 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>层为二维平面生长模式的高质量单晶薄膜。

通过场发射扫描电子显微镜(SEM,日立S4800)对 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的表面形貌进行了表征。采用紫外-可见分光光度计系统(SHIMADZU UV-2700),测量样品的光学特性。 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>拉曼信号由激光束( $\lambda = 633$  nm)通过物镜(50 $\times$ )聚焦在样品上而泵浦得到,并通过配置CCD(Horiba HR)的微区光致发光装置( $\mu$ -PL)收集。



(a)—3 min;(b)—60 min。

图2 在不同生长时间(3和60 min)下的RHEED图

Figure 2 RHEED pattern of the sample along the [010] azimuth after 3 min and 60 min growth

### 1.2 器件制备与测试

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜是通过电子束蒸发沉积的厚100 nm的金属薄膜,其在经过标准光刻后用I<sub>2</sub>/KI水溶液(体积比为1:3:20)蚀刻,以形成叉指电极图案。 $I$ - $V$ 曲线和光响应特性曲线特性的测试,是将氙灯(功率150 W)作为光源并由源表(Keysight 2902A)收集电信号得出。使用波长266 nm脉冲激光(脉冲持续时间为3 ns)泵浦并通过示波器(Agilent DSO1012A)

记录电信号,测量瞬态光响应特性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的表征

为了进一步检测生长样品的结晶质量,使用原子力显微镜(AFM)分析 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的表面平整度(见图3)。从图3可见, $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的表面粗糙度(RMS)为0.79 nm,这表明 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜具有优异的均匀平整表面。

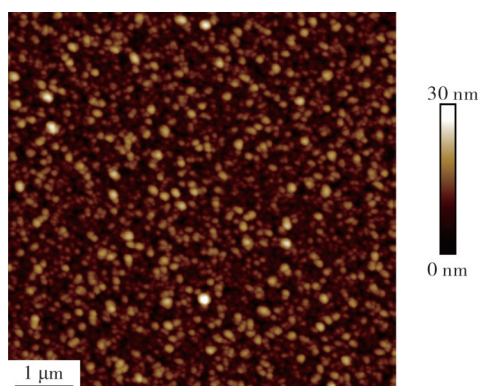
图3  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的原子力显微镜图Figure 3 The AFM image of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film

图4为在双抛光C面蓝宝石衬底上生长的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>样品的光学图像。从图4可见,通过样品边缘颜色差异可以区分衬底与 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜。

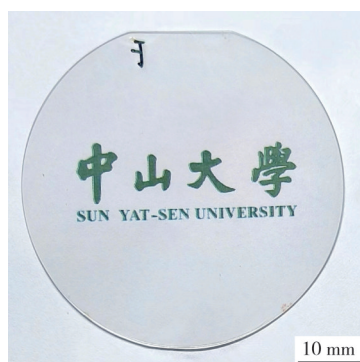
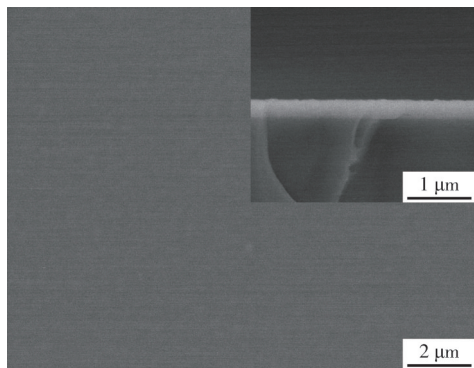
图4  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的光学成像图Figure 4 The optical image of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film

图5为 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的扫描电镜图像。从图5可见, $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜表面平坦,单晶薄膜晶体分布致密、厚度均匀,其厚度约为250 nm,这意味着原子是严格按照晶格结构整齐分布。

图5  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的扫描电镜图像Figure 5 The SEM image of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜生长形态和结构的细节可以通过TEM及选区电子衍射(SAED)图案给出(见图6)。从图6可见,在复合缓冲层(Ga/GaO)上, $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>层与蓝宝石衬底之间的晶格失配被抑制,因此异质外延的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜显示出完整的 $\beta$ 相晶体结构,对应的电子衍射图案也证实了 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的高晶体质量。

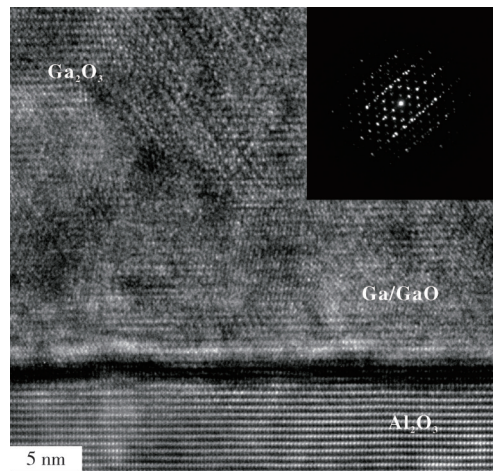
图6  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的透射电镜图像Figure 6 The TEM image of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film

图7为Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的X射线衍射(XRD)图。从图7可见:除蓝宝石衍射峰外,位于18.9°、38.3°和59°处还存在其他的衍射尖峰,他们分别对应了 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶体的(-201)、(-402)和(-603)平面,除此之外再无法找到其他Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相的衍射峰,这表明沉积到c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>衬底上的薄膜为单晶结构;局部放大的(-201)衍射峰的半高宽为0.24°,尖锐的衍射峰证明了 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的高结晶质量。

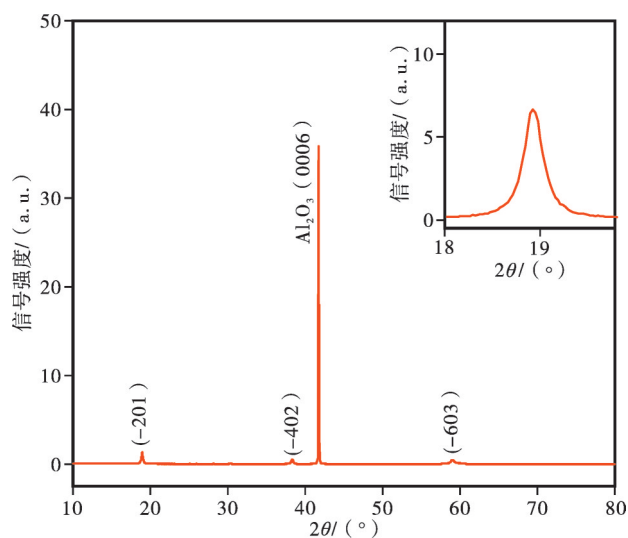
图7  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的XRD图Figure 7 The XRD pattern of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film



图8为 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的透射谱。从图8可见, $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜从近紫外到可见光区域表现出较高的透射率,而在波长小于236 nm区域透射率突然下降,这对应于来自带间跃迁的强吸收<sup>[32-33]</sup>。以上实验结果表明,大尺度高质量的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜是适合用于制备UVC区(210—280 nm)的高性能日盲光电探测器的平台。

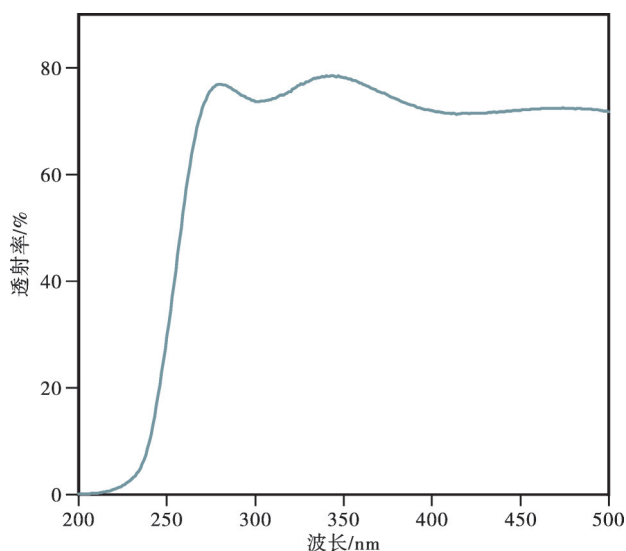
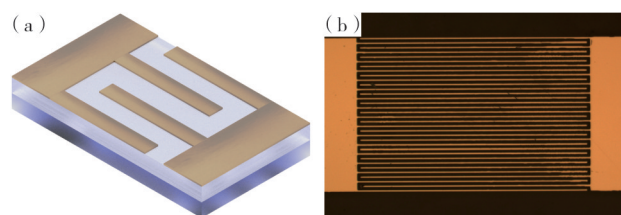


图8  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的透射谱

Figure 8 The transmittance spectrum of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilm

## 2.2 基于 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜日盲探测器的制备与测试

基于本征 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的高结晶度和光吸收特性,构建了金属-半导体-金属(MSM)结构探测器。图9为构建的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基光电探测器的示意图及实物图。通过标准光刻技术在薄膜表面上制备17对Au叉指电极的图案。



(a)—器件示意图;(b)—器件实物图。

(a)—schematic diagram;(b)—optical image.

图9 MSM型 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>光电探测器

Figure 9 MSM type  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photodetector

在室温(RT)下,对器件进行了电流-电压( $I$ - $V$ )特性曲线测试,结果如图10所示。从图10可见, $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基MSM器件的暗电流在50 V时约为2 nA,

而在DUV光照射( $\lambda=250$  nm)下光电流显著增加达到162 nA,在20 V时光/暗电流比接近130,这表明光电探测器具有出色的光响应能力。MSM器件的暗电流如此低,可归结于器件中未掺杂高阻态的单晶 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜和肖特基结。也就是说,具有低密度氧空位缺陷、纳安级别的暗电流和较大的光/暗电流比的 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜是日盲探测器潜在的光吸收材料<sup>[34]</sup>。随着外部施加电压的增加,光电流与电压的关系表现出非线性行为,这种行为与强电场下载流子漂移速度和收集效率的增大有关,类似的现象在基于金刚石的光电探测器中也被观察到<sup>[35-36]</sup>。光电流的非线性增大还可能与薄膜和电极之间肖特基势垒有关。肖特基势垒的形成对表面的原子组成和极性对氧化半导体(如ZnO)的表面载流子的分布会产生很大的影响,从而在电极和半导体之间的界面形成肖特基势垒<sup>[6,37-38]</sup>。在高偏压下,肖特基势垒高度逐渐被降低,光电流逐渐增大,强电场会引起电子碰撞使金属/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>界面处的深能级缺陷将被激活,因此从金属到 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的隧穿电流上升及复合中心浓度的降低是高电压下光电流增益的主要原因<sup>[22,38]</sup>。

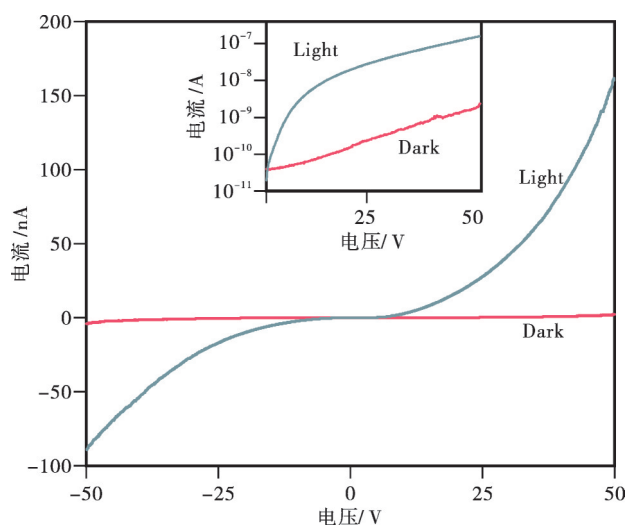


图10 在光照和黑暗条件下MSM型 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>光电探测器的 $I$ - $V$ 特性曲线

Figure 10 Typical  $I$ - $V$  curve of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind detector tested with UV light irradiation and dark surrounding, respectively.

图11为在不同偏压下器件的波长响应特性曲线。从图11可见,当偏置电压为45 V时,在225 nm处的响应度增加到229 mA·W<sup>-1</sup>;在不同偏压情况下,最大响应度的变化几乎呈现线性增长并没有出现饱和现象;在位于254 nm处的尖锐下降边缘表示

光电探测器的紫外线截止波长位置,这证实了该器件为一个优异的日盲光电探测器。

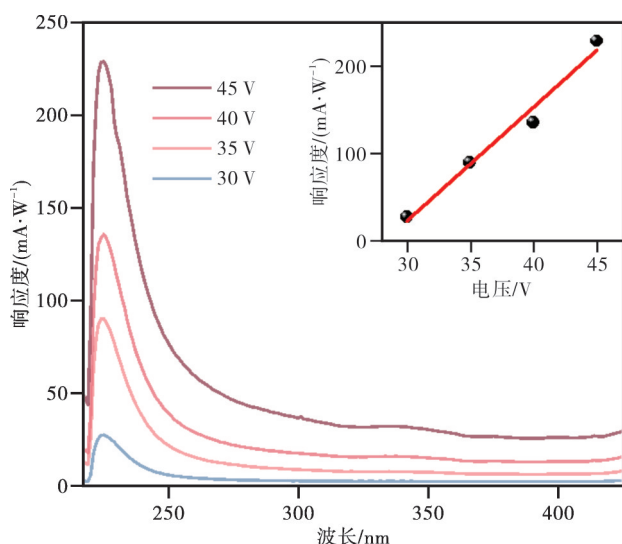


图 11 MSM型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电探测器的波长响应特性

Figure 11 Response spectra of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  DUV photodetector

在恒定的外部驱动电压(30 V)下,光生载流子的弛豫动力学特性可以由双指数公式拟合,即  $y = y_0 + A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2}$ , 其中  $y_0$  是常数、 $\tau_1$  和  $\tau_2$  是衰减时间常数、 $A_1$  和  $A_2$  是系数。为了评估 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电探测器的瞬态响应特性,图12为器件在266 nm纳秒脉冲激光照射下的瞬态光响应特性。从图12可见, $\tau_1$  和  $\tau_2$  的值分别为1.31和8.73 ms。考虑到 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 单晶薄膜中载流子的激发和复合动力学过程,一般使用两种典型的弛豫机制解释上述衰减时间常数。衰变分量 $\tau_1$ 起源于相邻叉指电极在电场作用下的快速漂移过程,当激发光信号关闭时载流子的浓度快速降低。相对较长的时间 $\tau_2$ 与半导体PPC现象有关。薄膜中的深能级陷阱可以捕获光生载流子,随着光信号关闭捕获的载流子会逐渐释放,导致光响应的缓慢衰减特性<sup>[39]</sup>。实际上,在多种氧化物半导体介质的光电探测器中也观察到了PPC效应<sup>[40-41]</sup>,这些器件虽然通过氧空位和位错捕获光生载流子积累以实现高响应度,但这是以牺牲响应速度为代价的<sup>[28,42]</sup>。相对而言,在高质量单晶线 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的基础上制备光电探测器,抑制了PPC效应并实现了较大的光增益,快速上升和下降瞬态动态特性证明了器件具备快速响应能力。

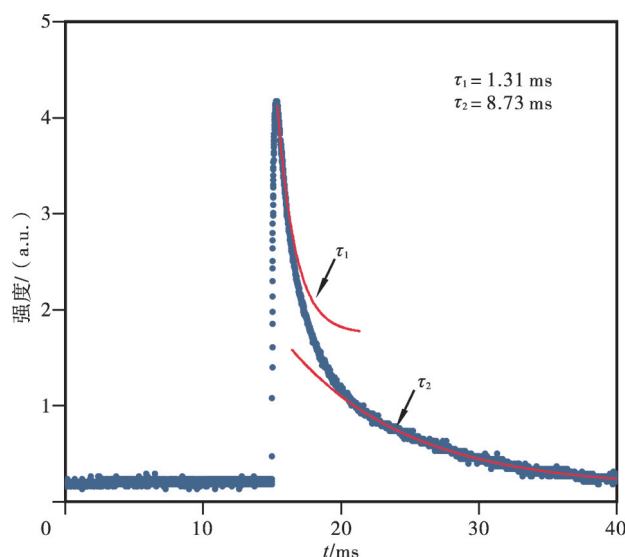


图 12 MSM型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光电探测器的瞬态响应特性

Figure 12 The transient photo-response of device with the irradiation of 266 nm nanosecond pulse laser

### 3 结论

本文成功地制备了基于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质外延单晶薄膜的快速响应DUV光电探测器,并利用Ga/GaO复合缓冲层使 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜与衬底之间的晶格失配受到显著抑制,在深紫外光照射和不均匀的电荷分布下产生了肖特基势垒,导致了高电压下较大隧道光电流增益和较低的暗电流。最重要的是,该器件实现了 $235 \text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$ 的高响应率和1.31 ms的快速响应时间。上述结果表明,优秀的晶体质量和更大尺寸的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质外延薄膜将为制造DUV探测器芯片阵列提供可行的平台, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基透明薄膜优异的光电性能可用于自由空间中的紫外光检测、太阳能电池和军事探测等光电探测领域中。

### 参考文献:

- [1] GLASER P E. Power from the sun: Its future [J]. Science, 1968, 162(3856): 857-861.
- [2] MATSUMURA Y, ANANTHASWAMY A, HONNAVARRA N. Toxic effects of ultraviolet radiation on the skin [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2004, 195(3): 298-308.
- [3] BLAUSTEIN A R, ROMANSIC J M, KIESECKER J M, et al. Ultraviolet radiation, toxic chemicals and amphibian population declines [J]. Diversity and

- Distributions, 2003, 9(2): 123-140.
- [4] KAKANI V G, REDDY K R, ZHAO D, et al. Field crop responses to ultraviolet-B radiation: A review [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 120: 191-218.
- [5] LOU G, WU Y, ZHU H, et al. Upconversion single-microbelt photodetector via two-photon absorption simultaneous [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(19): 19LT01.
- [6] ENDO H, SUGIBUCHI M, TAKAHASHI K, et al. Schottky ultraviolet photodiode using a ZnO hydrothermally grown single crystal substrate [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(12): 88-91.
- [7] JIA L, ZHENG W, HUANG F. Vacuum-ultraviolet photodetectors [J]. Photonix, 2020, 1(1): 22.
- [8] ZHENG W, JIA L, HUANG F. Vacuum-ultraviolet photon detections [J]. IScience, 2020, 23(6): 101145.
- [9] HASSA A, WOUTERS C, KNEIB M, et al. Control of phase formation of (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on c-plane Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(48): 485105.
- [10] 林丹, 王巧, 王君君, 等. 基于自动温控光谱测试系统的深紫外LED光电特性研究[J]. 材料研究与应用, 2019, 13(2): 102-106.
- [11] OSHIMA T, OKUNO T, FUJITA S. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film growth on c-plane sapphire substrates by molecular beam epitaxy for deep-ultraviolet photodetectors [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(11R): 7217.
- [12] 刘宁炆, 王巧, 王君君, 等. AlN单晶薄膜扫描光谱椭圆偏研究[J]. 材料研究与应用, 2016, 10(3): 181-185.
- [13] ZHENG W, LIN R, RAN J, et al. Vacuum-ultraviolet photovoltaic detector [J]. ACS Nano, 2018, 12(1): 425-431.
- [14] JIA L, HUANG F, ZHENG W. Vacuum ultraviolet (120—200 nm) avalanche photodetectors [J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(8): 1-7.
- [15] QIN Y, SUN H, LONG S, et al. High performance metal-organic chemical vapor deposition grown  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar blind photodetector with asymmetric schottky electrodes [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(9): 1475-1478.
- [16] PEARTON S J, YANG J, CARY P H, et al. A review of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials, processing, and devices [J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(1): 11301.
- [17] WEI T C, TSAI D S, RAVADGAR P, et al. See-through Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind photodetectors for use in harsh environments [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(6): 112-117.
- [18] PLAYFORD H Y, HANNON A C, BARNEY E R, et al. Structures of uncharacterised polymorphs of gallium oxide from total neutron diffraction [J]. Chemistry—A European Journal, 2013, 19(8): 2803-2813.
- [19] LI L, AUER E, LIAO M, et al. Deep-ultraviolet solar-blind photoconductivity of individual gallium oxide nanobelts [J]. Nanoscale, 2011, 3(3): 1120-1126.
- [20] KIM J, OH S, KIM J, et al. Quasi-two-dimensional  $\beta$ -gallium oxide solar-blind photodetectors with ultrahigh responsivity [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4(39): 9245-9250.
- [21] TENG Y, SONG L X, PONCHEL A, et al. Self-assembled metastable  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoflowers with hexagonal nanopetals for solar-blind photodetection [J]. Advanced Materials, 2014, 26(36): 6238-6243.
- [22] KONG W Y, WU G A, WANG K Y, et al. Graphene  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction for highly sensitive deep UV photodetector application [J]. Advanced Materials, 2016, 28(48): 10725-10731.
- [23] CHEN Y C, LU Y J, LIN C N, et al. Self-powered diamond/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photodetectors for solar-blind imaging [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(21): 5727-5732.
- [24] KOBAYASHI T, GAKE T, KUMAGAI Y, et al. Energetics and electronic structure of native point defects in  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. Applied Physics Express, 2019, 12(9): 2019.
- [25] 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]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(33): 335103.
- [26] HIGASHIWAKI M, KURAMATA A, MURAKAMI H, et al. State-of-the-art technologies of gallium oxide power devices [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(33): 333002.
- [27] SINGH PRATIYUSH A, KRISHNAMOORTHY S, VISHNU SOLANKE S, et al. High responsivity in molecular beam epitaxy grown  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal semiconductor metal solar blind deep-UV photodetector [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(22): 1-6.
- [28] XU Y, CHEN X, ZHOU D, et al. Carrier transport and gain mechanisms in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based metal-semiconductor-metal solar-blind schottky photodetectors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(5): 2276-2281.

- [29] MOMMA K, IZUMI F. VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data [J]. Journal of Applied Crystallography, 2011, 44(6): 1272-1276.
- [30] FENG Q, LI X, HAN G, et al. (AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind photodetectors on sapphire with wider bandgap and improved responsivity [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(4): 1240.
- [31] VOGT P, BIERWAGEN O. Reaction kinetics and growth window for plasma-assisted molecular beam epitaxy of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Incorporation of Ga vs. Ga<sub>2</sub>O desorption [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(7): 1-5.
- [32] CHENG L, WU Y, ZHONG W, et al. Photophysics of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Phonon polaritons, exciton polaritons, free-carrier absorption, and band-edge absorption [J]. Journal of Applied Physics, 2022, 132(18): 185704.
- [33] CHENG L, ZHU Y, WANG W, et al. Strong electron-phonon coupling in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: A huge broadening of self-trapped exciton emission and a significant red shift of the direct bandgap [J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2022, 13(13): 3053-3058.
- [34] KAUR D, KUMAR M. A strategic review on gallium oxide based deep-ultraviolet photodetectors: Recent progress and future prospects [J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(9): 1-34.
- [35] SZE S M. Physics of semiconductor devices [M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 1981.
- [36] BRILLSON L J, LU Y. ZnO schottky barriers and ohmic contacts [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(12): 121301.
- [37] LIU Z, WANG X, LIU Y, et al. A high-performance ultraviolet solar-blind photodetector based on a  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> schottky photodiode [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(44): 13920-13929.
- [38] LIAO M, WANG X, TERAJI T, et al. Light intensity dependence of photocurrent gain in single-crystal diamond detectors [J]. Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics, 2010, 81(3): 13-16.
- [39] HOU X, ZHAO X, ZHANG Y, et al. High-performance harsh-environment-resistant GaO<sub>x</sub> solar-blind photodetectors via defect and doping engineering [J]. Advanced Materials, 2022, 34(1): 1-11.
- [40] SOCI C, ZHANG A, XIANG B, et al. ZnO nanowire UV photodetectors with high internal gain [J]. Nano Letters, 2007, 7(4): 1003-1009.
- [41] GUO D Y, WU Z P, AN Y H, et al. Oxygen vacancy tuned Ohmic-Schottky conversion for enhanced performance in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2): 23507.
- [42] YANG C, LIANG H, ZHANG Z, et al. Self-powered SBD solar-blind photodetector fabricated on the single crystal of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. RSC Advances, 2018, 8(12): 6341-6345.

## High-Temporal Dynamic $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky Type Solar-Blind Photodetector via Heteroepitaxy Single Crystalline Film

TANG Ziying, ZHU Hai\*

(Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies/School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** In this report, we successfully fabricate a  $\beta$ -phase Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single-crystalline film based high performance solar-blind photodetector. Based on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystalline film hetero-grown via plasma-assisted molecular beam epitaxy (PA-MBE) on sapphire substrates, the solar-blind detector is constructed by interdigitated Au-electrode with the metal-semiconductor-metal structure. The dark-state current of the device is low as 130 pA, meanwhile the UV photon-responsivity is  $>229 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$  at the peak of 225 nm. Moreover, the device exhibits an ultrafast transient characteristic of DUV signals with a decay time of 1.31 ms. The excellent performances of the device could be attributed to the high crystalline quality of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and giant field mobility in Schottky junction. Our results present a significant step towards future applications of two-dimension array DUV photodetector based on larger scale  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heteroepitaxy film.

**Keywords:** MBE; film; solar-blind band; photodetector

(学术编辑: 褚欣)