

文章编号: 1000-7032(2024)03-0476-08

n-Ga₂O₃/p-GaAs 异质结日盲紫外探测器制备

党新明, 焦 腾, 陈沛然, 于 含, 韩 宇, 李 震, 李轶涵, 董 鑫*

(吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)工艺在 p-GaAs(100)衬底上外延了 Ga₂O₃ 薄膜并制备了 n-Ga₂O₃/p-GaAs 异质结日盲紫外探测器。通过 X 射线衍射仪、原子力显微镜、场发射扫描电子显微镜等方法对 Ga₂O₃ 薄膜表面形貌、晶体质量进行了测试与分析。结果表明, Ga₂O₃ 薄膜呈单一晶向, 薄膜表面平整且为 Volmer-Weber 模式外延。测试表明, n-Ga₂O₃/p-GaAs 异质结探测器具有明显的整流特性。器件在 5 V 反向偏压和紫外光(254 nm)照射下实现了超过 3.0×10⁴ 的光暗电流比、7.0 A/W 的响应度、3412% 的外量子效率、4.6×10¹³ Jones 的探测率。我们利用 TCAD 软件对器件结构进行仿真, 得到了器件内的电场分布和能带结构, 并分析了器件的工作原理。该异质结探测器性能较好, 制造工艺简单, 为 Ga₂O₃ 超灵敏日盲紫外探测器的研制提供了新途径。

关键词: 氧化镓; 金属有机化学气相沉积; 异质结; 日盲紫外探测器

中图分类号: O482.31; TN36 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230320

Preparation of n-Ga₂O₃/p-GaAs Heterojunction Solar-blind UV Photodetectors

DANG Xinming, JIAO Teng, CHEN Peiran, YU Han, HAN Yu, LI Zhen, LI Yihan, DONG Xin*

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding Author, E-mail: dongx@jlu.edu.cn

Abstract: Ga₂O₃ thin films were deposited on p-GaAs(100) substrates by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) process for the preparation of n-Ga₂O₃/p-GaAs heterojunction solar-blind UV photodetectors (PDs). The surface morphology and crystal quality of Ga₂O₃ thin films were measured and analyzed by X-ray diffractometer, atomic force microscope, and field emission scanning electron microscope. The results showed that the Ga₂O₃ thin films exhibited a single crystal orientation, with a flat surface and Volmer-Weber mode epitaxy. The characterization indicated that the n-Ga₂O₃/p-GaAs heterojunction detector exhibited an obvious rectification characteristic. The device achieves a photo-dark current ratio of more than 3.0 × 10⁴, a responsivity of 7.0 A/W, an external quantum efficiency of 3412%, and a detectivity of 4.6 × 10¹³ Jones under 5 V reverse bias and UV(254 nm) illumination. The device structure was simulated using TCAD software, obtaining the electric field distribution and band structure inside the device, and the working principle of the device was analyzed. The performance of the heterojunction detector was excellent and the manufacturing process was simple, providing a new avenue for the development of Ga₂O₃ ultrasensitive solar-blind UV photodetectors.

Key words: Ga₂O₃; metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD); heterojunction; solar-blind UV photodetectors

收稿日期: 2023-12-16; 修订日期: 2024-01-03

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3605500); 吉林省自然科学基金(20230101124JC, 20220101119JC)

Supported by National Key Research and Development Program of China(2022YFB3605500); Natural Science Foundation of Jilin Province(20230101124JC, 20220101119JC)

1 引言

日盲紫外探测器(PDs)可以有效探测 200~280 nm 范围内的电磁波,在火灾探测、紫外预警、深空探测等方面发挥着重要作用^[1-6]。近年来,Zn-MgO^[7]、AlGaIn^[8-9]和 Ga₂O₃^[10-12]等宽禁带半导体材料已经广泛应用于日盲紫外探测器的制备。其中,氧化镓(Ga₂O₃)的禁带宽度约为 4.2~5.1 eV^[13],对应于 243~295 nm 的日盲紫外波段。与其他宽禁带半导体材料相比,Ga₂O₃还具有良好的化学稳定性和热稳定性^[14-16]、易于大面积制备以及高击穿电压等优点^[17-18]。截至目前,各类文献已经报道了多种类型的 Ga₂O₃ 基日盲紫外探测器,包括光电导型(MSM)^[19-20]、PN 结型^[21-29]、金属-半导体结型^[30-32]和场效应管型^[33-35]等。其中,PN 结型的日盲紫外探测器得益于内建电场对于光生载流子的驱动作用,具有较好的响应度和响应时间,是目前 Ga₂O₃ 日盲紫外探测器的主要研究方向之一。

然而,目前稳定的 p 型 Ga₂O₃ 材料难以制备,这使得 PN 结型的 Ga₂O₃ 日盲紫外探测器多基于异质结而研制^[36]。砷化镓(GaAs)作为目前广泛应用的半导体材料之一,具有成本低、可以大规模制备、p 型掺杂稳定等优点,是与 Ga₂O₃ 制备异质结的理想材料。Ga₂O₃ 在镓基半导体上的异质外延较为容易^[37-38],也更有利于获得更高质量的 Ga₂O₃ 薄膜。本文首先在 p-GaAs 衬底上进行了 Ga₂O₃ 薄膜的异质外延并基于外延形成的异质结制备了 Ga₂O₃ 日盲紫外探测器,同时对薄膜和探测器的性能参数进行了测试表征。

2 实验

2.1 样品制备

我们采用 MOCVD 工艺在 2 英寸 p-GaAs(100) 衬底上外延 Ga₂O₃ 薄膜,p-GaAs 衬底的空穴浓度约为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 430 μm 。在外延之前,用丙酮、乙醇和去离子水依次对衬底超声清洗 5 min,然后将衬底用氮气吹干并放置在 MOCVD 反应腔中。MOCVD 使用的反应源为三乙基镓(TEGa, 6 N)和高纯氧气(6 N)。硅烷(SiH₄, 10⁻⁵)作为 n 型掺杂剂,高纯氩气(6 N)作为 TEGa 和 SiH₄ 的载气。在外延过程中,反应腔内的温度保持在 530 $^{\circ}\text{C}$,压强保持在 4 kPa,氧气的流速为 400 mL/min,TEGa 载气的流速为 40 mL/min。

在外延过程中,我们利用以往的实验数据,首

先外延非故意掺杂(UID)Ga₂O₃ 薄膜作为日盲紫外光的吸收层,其电子浓度约为 $1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,厚度约为 180 nm。然后将 SiH₄ 载气的流量设定为 10 mL/min,外延 n-Ga₂O₃ 薄膜作为欧姆接触层,其电子浓度约为 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,厚度约为 15 nm。薄膜外延结束后,继续在反应腔内原位退火 30 min,退火温度为 530 $^{\circ}\text{C}$,以降低 Ga₂O₃ 薄膜中的缺陷密度,提高薄膜质量。设备降温后,将样品取出进行器件的电极制备。采用电子束蒸发工艺,首先通过硬掩模在 Ga₂O₃ 薄膜表面沉积直径为 0.8 mm 的 Ti/Au(20 nm/100 nm)电极阵列;然后在 p-GaAs 背面沉积 Au 电极,厚度 300 nm,并在 500 $^{\circ}\text{C}$ 下的氮气氛围内快速热退火(RTA)1 min,以形成良好的欧姆接触;之后通过激光切割实现器件分离。

2.2 样品表征

我们对外延的 Ga₂O₃ 薄膜进行了测试与表征。采用 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku, Ultima IV, Tokyo, Japan, $\lambda = 0.154 \text{ nm}$)测定 Ga₂O₃ 薄膜的晶体质量;使用场发射扫描电子显微镜(FESEM, JOEL, JSM-7900, Tokyo, Japan)研究样品表面形貌和薄膜厚度;使用原子力显微镜(AFM, PlainView, Veeco, NY, USA)测量样品表面粗糙度。器件测试使用了探针台、源表(Keithley 2612B)、150W Xenon Lamp、岛津 UV1700 紫外-可见分光光度计、3535 UV LED 光源和光功率计(Thorlabs PM100D, S120VC)。所有测试均在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 薄膜测试与表征

为了分析 Ga₂O₃ 薄膜的晶体质量,我们对样品进行 SEM 测试。薄膜表面的测试结果如图 1(a) 所示,从图中可以发现,Ga₂O₃ 薄膜以 Volmer-Weber 模式外延^[39]。反应生成物首先在 p-GaAs 衬底上形成三维小岛,之后随着外延的进行,小岛逐渐扩大并形成柱状岛,最终柱状岛合并形成膜。薄膜的截面照片如图 1(b)所示,从图中可以发现,Ga₂O₃ 薄膜与 p-GaAs 衬底之间的分界平直清晰,薄膜厚度约为 195 nm 且厚度均匀。薄膜的 XRD 2theta-omega 模式扫描结果如图 1(c)所示,从图中可以发现,Ga₂O₃ 薄膜在 $2\theta=30.09^{\circ}$ 处可以观察到单一的衍射峰,对应其(400)衍射面,这表明 Ga₂O₃ 薄膜取向单一。根据标准卡(JCDPS # 43-1012),表明该薄膜为 β -Ga₂O₃。薄膜表面的 AFM 照片如图 1(d)所示,从图中可以发现,在 10 $\mu\text{m} \times$

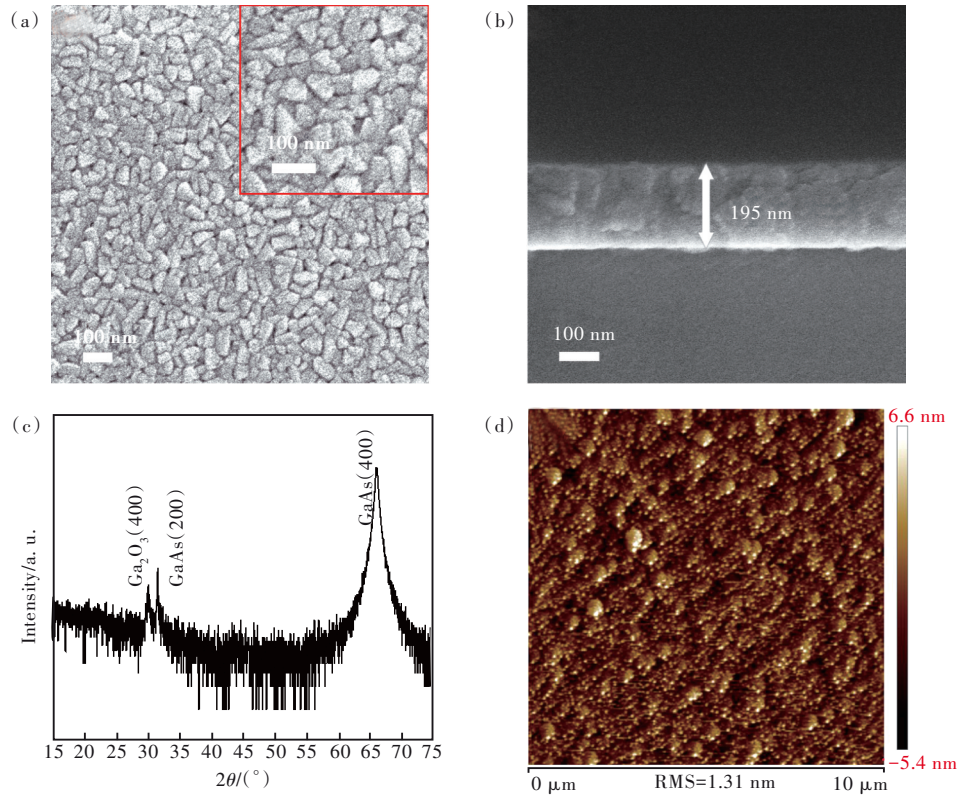


图1 (a)Ga₂O₃薄膜表面的SEM照片;(b)Ga₂O₃薄膜截面的SEM照片;(c)Ga₂O₃薄膜XRD 2theta-omega图;(d)Ga₂O₃薄膜表面的AFM照片

Fig.1 (a)SEM images of Ga₂O₃ thin films surface. (b)SEM images of Ga₂O₃ thin films cross section. (c)XRD 2theta-omega images of Ga₂O₃ thin films. (d)AFM images of Ga₂O₃ thin films surface

10 μm扫描范围内,薄膜表面非常平整,粗糙度为1.31 nm。以上测试结果表明, MOCVD制备的Ga₂O₃薄膜具有较高的晶体质量,这为n-Ga₂O₃/p-GaAs异质结和性能器件的制备提供了基础。

3.2 器件结构与测试

图2(a)为n-Ga₂O₃/p-GaAs异质结日盲紫外探测器结构示意图。该器件从下到上分别为Au电极、p-GaAs衬底、UID-Ga₂O₃薄膜和n-Ga₂O₃薄膜。由于异质外延的Ga₂O₃薄膜内缺陷密度较高,通过在i-GaAs上同样外延条件下的Ga₂O₃薄膜的霍尔测试,得到UID-Ga₂O₃背景电子浓度为 $1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, n-Ga₂O₃电子浓度为 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。图2(b)为黑暗条件下器件的*I-V*特性曲线,从图中可以看到器件具有非常好的整流特性,正向导通电压为3.9 V。图2(c)、(d)分别为器件在5 V反向偏压且在254 nm紫外光照射时,光电流和光功率密度关系,从图中可以看到光电流和光功率密度成正比。这是因为光功率密度增加,将使得空间电荷区内产生更多的光生载流子。此外,由于异质外延薄膜内的较高缺陷密度和背景电子浓度,器

件在5 V反偏压下的暗电流较高。

图3(a)为器件在5 V反向偏压下光暗电流比(PDCR) $R_{\text{P/D}}$ 和紫外光功率密度的关系。PDCR可以根据以下关系式计算:

$$R_{\text{P/D}} = (I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}) / I_{\text{dark}}, \quad (1)$$

其中 I_{photo} 和 I_{dark} 分别为器件的光电流和暗电流。从图3(a)看出,在5 V反偏压和 $300 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外光功率密度下,器件的PDCR达到了 3.0×10^4 。图3(b)显示了器件响应度(R)和光功率密度的关系。其中 R 可以根据以下关系式计算:

$$R = (I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}) / PS, \quad (2)$$

其中, P 表示光功率密度, S 表示有效的照射面积。本文中制备的器件有效面积约为 0.09 cm^2 。在一定范围内,随着光功率密度的增加,器件的 R 不断提高;而当光功率密度大于 $225 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, R 趋于饱和,这是光生载流子之间的复合效应增强引起的^[39-41]。

在反向偏压5 V、光功率密度为 $300 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,器件 R 达到了 7.0 A/W 。此外,器件的外量子效率(EQE) η_{EQE} 和探测率(D^*)可以分别根据以下

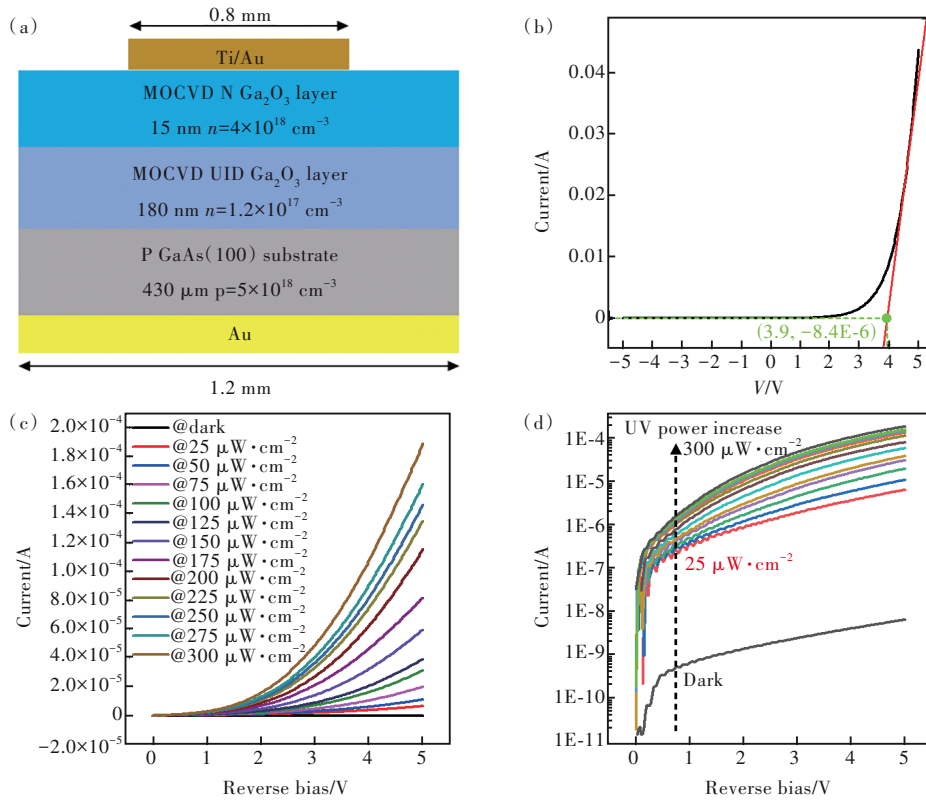


图 2 (a)探测器的结构示意图;(b)黑暗条件下器件的 I - V 特性曲线;(c)不同强度紫外光照射下器件的 I - V 特性曲线(线性坐标);(d)不同强度紫外光照射下器件的 I - V 特性曲线(对数坐标)

Fig.2 (a)Schematic diagram of detector structure. (b) I - V curve of PD under dark. (c) I - V curves of devices under different UV power densities in linear coordinate. (d) I - V curves of devices under different UV power densities in logarithmic coordinate

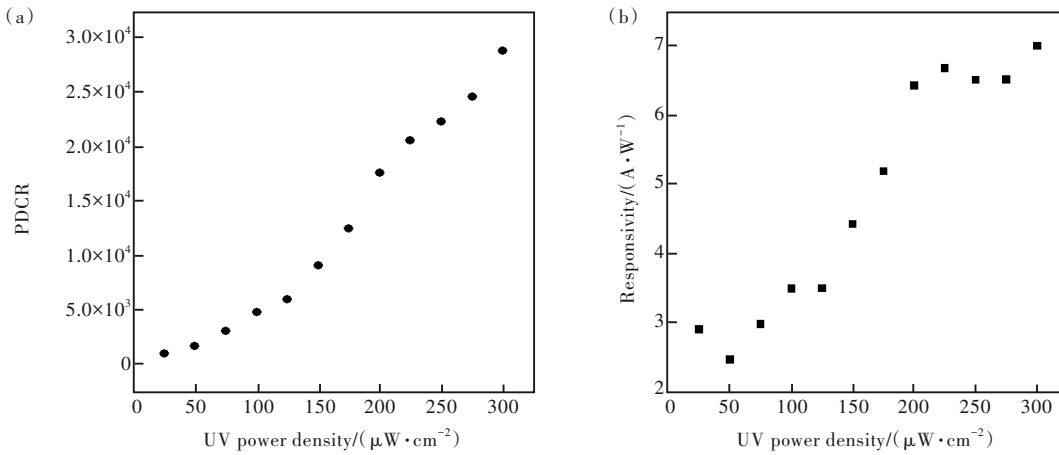


图 3 光功率密度与 PDCR(a)和 R (b)的关系

Fig.3 UV power densities versus PDCR(a) and R (b)

关系式计算:

$$\eta_{EQE} = Rhc/e\lambda, \quad (3)$$

$$D^* = RS^{1/2}/(2eI_{dark})^{1/2}, \quad (4)$$

其中 e 、 h 和 λ 分别为电子电荷、普朗克常量^[42]和紫外光波长。器件在对应于 7.0 A/W 的 R 时,相应的 EQE 和 D^* 分别为 3412% 和 4.6×10^{13} Jones。以上结果都说明 n-Ga₂O₃/p-GaAs 异质结日盲紫外探

测器对日盲紫外光具有良好的探测性能。

图 4(a)显示了该器件在不同条件下的光谱响应。从图中可以看出,该器件在 254 nm 紫外光下表现出最大 R ,截止波长约为 290 nm。该器件对紫外光响应处于日盲紫外区,且在可见光区域没有响应。

Ga₂O₃ 薄膜的光学禁带宽度(E_g)与吸收系数

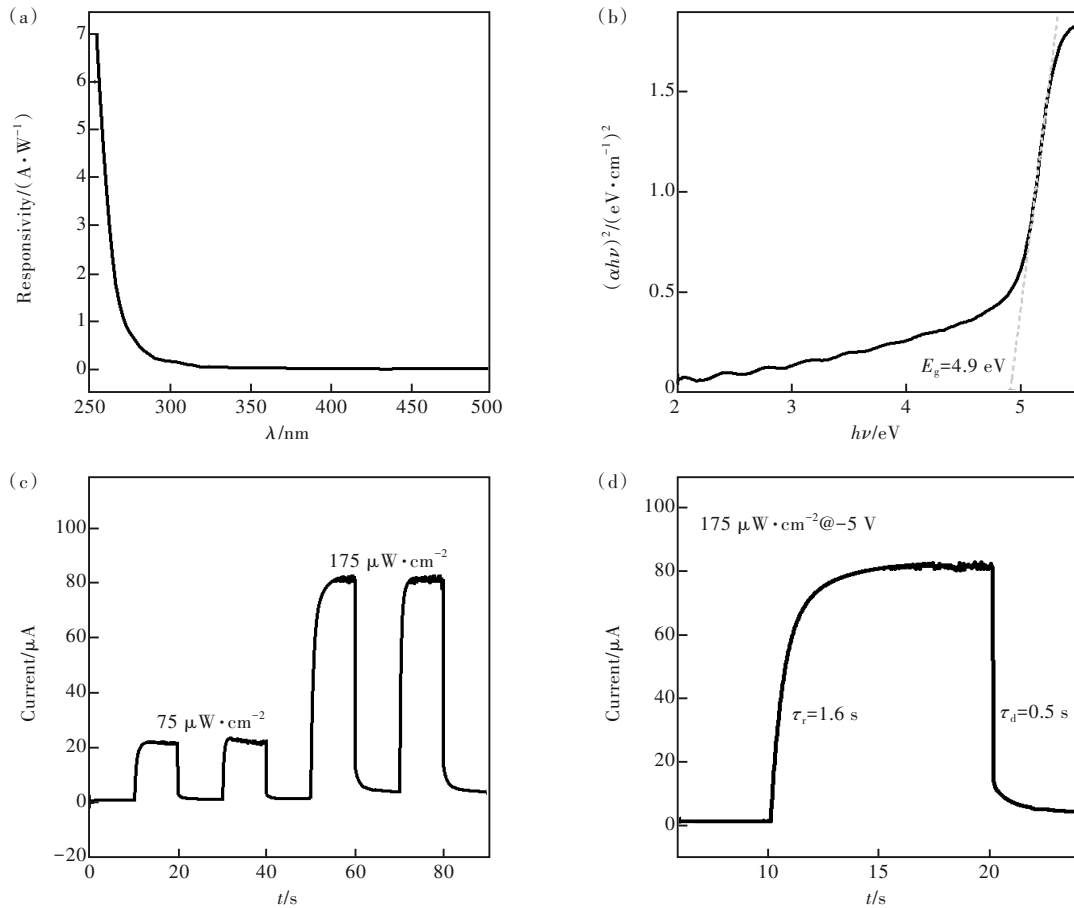


图4 (a)光谱响应;(b)氧化镓薄膜 $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ 曲线;(c)不同强度紫外光照射下的瞬态光响应;(d)光强度为 $175 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时对应的时间响应曲线

Fig.4 (a) Spectral response. (b) $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ curve of Ga_2O_3 thin film. (c) Time-dependent response under different UV power densities. (d) Time-dependent response under $175 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ UV

(α)之间存在以下对应关系:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g), \quad (5)$$

其中 A 、 h 和 ν 分别为常数、普朗克常量^[42]和入射光频率。通过Tauc法可求得 Ga_2O_3 薄膜的 E_g ,从图4(b)可以得到 $E_g=4.9 \text{ eV}$ 。

从图4(c)可以看出,该器件在几个紫外光开关周期内表现出显著且稳定的光电流变化,并且光电流和紫外光强度值呈正相关,表明该器件对紫外光照明的检测能力良好。从图4(d)可以看出,器件在单个检测周期内上升时间(τ_r)和衰减时间(τ_d)分别为 1.6 s 和 0.5 s ,这归因于内建电场对光生载流子的强驱动。

表1给出了已报道的部分异质结 Ga_2O_3 基紫外探测器的部分参数。 $\text{n-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-GaAs}$ 器件仅采用垂直型结构,工艺较为简单,与其他器件结构相比,具有较高的探测率和响应度,这为高性能 Ga_2O_3 异质结日盲紫外探测器制备提供了一条新途径。

表1 已经报道的 Ga_2O_3 基紫外探测器部分参数

Tab. 1 Parameters of a part of reported Ga_2O_3 PDs

Device structure	$R/$ ($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	$D^*/$ Jones	τ_r/τ_d
$\text{n-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-GaAs}$	7.0	4.6×10^{13}	1.6 s/0.5 s
$\text{Ti}/\text{Au}/\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Au}$ ^[20]	0.02	1×10^{12}	0.1 s/0.12 s
$\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ^[21]	0.002	1.21×10^{11}	—
$\text{ZnO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ^[22]	0.009 7	6.29×10^{12}	0.1 ms/0.9 ms
$\text{P-Si}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ^[23]	0.029	—	0.06 s/0.088 s
Mg:GaO_x ^[25]	0.14	—	0.02 s/0.15 s
$\text{Ga}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ ^[26]	0.067	8.23×10^{11}	0.18 s/0.31 s
$\text{SnS}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ ^[28]	0.000 17	2.56×10^{11}	0.99 s/0.32 s

3.3 器件仿真

为了明确器件的工作机理,我们采用TCAD软件对器件在不同条件下的能带和载流子传输机制进行了仿真。图5(a)显示了器件内的二维电场分布。从图5(b)中可以发现,器件在 5 V 反向

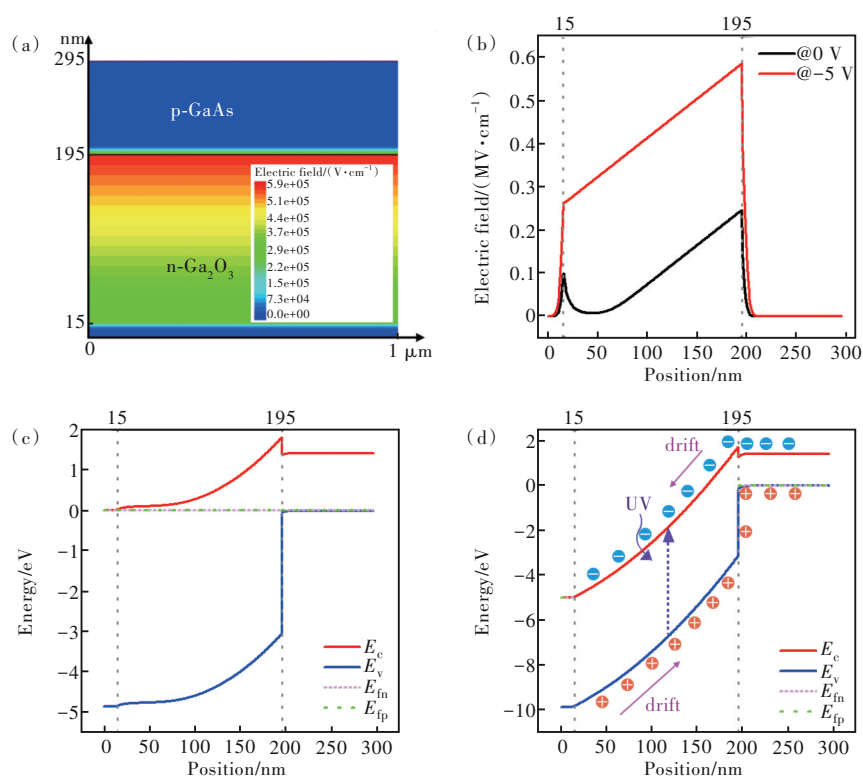


图5 (a)器件反向偏压5 V时的二维电场分布;(b)图5(a)中,沿器件垂直方向的电场分布;(c)器件平衡状态下的能带图;(d)器件在反向偏压5 V和紫外光照射时的能带图

Fig.5 (a) 2D electric field distribution of the device at -5 V. (b) Electric field curve in the vertical direction in Fig.5(a). (c) Energy band diagram of the device in equilibrium. (d) Energy band diagram of the device at -5 V under UV illumination

偏压下,UID-Ga₂O₃层完全耗尽且内部产生了较高的内建电场,电场强度比平衡态下高出2~3倍。更强的内建电场使光生载流子更快速地移动,从而提高了载流子的漂移速度并降低了载流子的复合几率,有利于提高器件的探测性能^[41]。图5(c)为平衡态下的能带图,从图中可以发现,当n-Ga₂O₃与p-GaAs接触时,由于费米能级的差异,p-GaAs中的空穴扩散到n-Ga₂O₃,而n-Ga₂O₃中的电子扩散到p-GaAs。这导致能带在p-GaAs的表面向下弯曲,在n-Ga₂O₃的表面向上弯曲,Ga₂O₃和GaAs的电子亲和势分别为3.61 eV和4.07 eV,禁带宽度分别为4.9 eV和1.4 eV,所以n-Ga₂O₃与p-GaAs形成了I型异质结。在扩散和漂移动态平衡后,n-Ga₂O₃与p-GaAs的费米能级处在相同的水平。界面处出现内建电场,其方向从n-Ga₂O₃指向p-GaAs。从图5(d)可以看出,在紫外光照射下,在空间电荷区会产生大量的电子-空穴对。光生载流子被内建电场迅速分离,最终被电极吸收,产生光电流^[43]。以上仿真模拟和理论分析充分验证了我们制备的n-Ga₂O₃/p-GaAs异质结日盲紫外探测器的合理性。

4 结 论

本文通过MOCVD工艺在p-GaAs上异质外延了Ga₂O₃薄膜。通过X射线衍射仪、场发射扫描电子显微镜和原子力显微镜对薄膜进行了表征测试。结果表明异质外延的Ga₂O₃薄膜具有较高的晶体质量。在此基础上我们通过电子束蒸发工艺直接沉积电极,制备了n-Ga₂O₃/p-GaAs异质结日盲紫外探测器。器件对日盲紫外光具有良好的光敏特性。在5 V反向偏压下,UID-Ga₂O₃层完全耗尽且内部产生了较高的内建电场,提高了载流子的漂移速度并降低了载流子的复合几率。由于n-Ga₂O₃/p-GaAs异质结界面处内建电场对光生电子空穴对的快速分离,器件在254 nm光照下实现了 3.0×10^4 的光暗电流比、7.0 A/W的响应度、3412%的外量子效率和 4.6×10^{13} Jones的探测率。该器件性能良好,制备工艺简单,为高性能Ga₂O₃异质结日盲紫外探测器制备提供了一条新途径。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230320>.

参 考 文 献:

- [1] CAI Q, YOU H F, GUO H, *et al.* Progress on AlGaIn-based solar-blind ultraviolet photodetectors and focal plane arrays [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 94.
- [2] CHEN X R, MI W, WU J W, *et al.* A solar-blind photodetector based on β -Ga₂O₃ film deposited on MgO (100) substrates by RF magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2020, 180: 109632.
- [3] CHEN X H, REN F F, YE J D, *et al.* Gallium oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2020, 35(2): 023001.
- [4] GUO Y L, LIU C, TANAKA H, *et al.* Air-stable and solution-processable perovskite photodetectors for solar-blind UV and visible light [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2015, 6(3): 535-539.
- [5] LI Z M, JIAO T, LI W C, *et al.* Solar-blind ultraviolet photodetectors based on homoepitaxial β -Ga₂O₃ films [J]. *Opt. Mater.*, 2021, 122: 111665.
- [6] 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.
- [7] LIU K W, SHEN D Z, SHAN C X, *et al.* The growth of ZnMgO alloy films for deep ultraviolet detection [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, 41(12): 125104.
- [8] LV Z S, LIU L, SUN Y, *et al.* Inclined and gradient Al component AlGaIn nanostructures with enhanced photoelectric performance for solar-blind UV detectors [J]. *Solid State Commun.*, 2022, 342: 114645.
- [9] GAUTAM L, LEE J, BROWN G, *et al.* Low dark current deep UV AlGaIn photodetectors on AlN substrate [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2022, 58(3): 4000205.
- [10] BORELLI C, BOSIO A, PARISINI A, *et al.* Electronic properties and photo-gain of UV-C photodetectors based on high-resistivity orthorhombic κ -Ga₂O₃ epilayers [J]. *Mater. Sci. Eng. : B*, 2022, 286: 116056.
- [11] MA G L, GAO A, LIU Z, *et al.* Solution spin-coated BiFeO₃ onto Ga₂O₃ towards self-powered deep UV photo detector of Ga₂O₃/BiFeO₃ heterojunction [J]. *IEEE Sens. J.*, 2021, 21(21): 23987-23994.
- [12] PARK S H, LEE H S, AHN H S, *et al.* Thin film growth of ε -Ga₂O₃ and photo-electric properties of MSM UV photodetectors [J]. *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.*, 2019, 29(4): 179-186.
- [13] PEARTON S J, YANG J C, CARY IV P H, *et al.* A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2018, 5(1): 011301.
- [14] ZHI Y S, JIANG W Y, LIU Z, *et al.* High-responsivity solar-blind photodetector based on MOCVD-grown Si-doped β -Ga₂O₃ thin film [J]. *Chin. Phys. B*, 2021, 30(5): 057301.
- [15] HIGASHIWAKI M, SASAKI K, GOTO K, *et al.* Ga₂O₃ Schottky barrier diodes with n⁻-Ga₂O₃ drift layers grown by HVPE [C]. *Proceedings of the 73rd Annual Device Research Conference, Columbus*, 2015: 29-30.
- [16] RAFIQUE S, KARIM M R, JOHNSON J M, *et al.* LPCVD homoepitaxy of Si doped β -Ga₂O₃ thin films on (010) and (001) substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112(5): 052104.
- [17] HIGASHIWAKI M, SASAKI K, WONG M H, *et al.* Current status of gallium oxide-based power device technology [C]. *Proceedings of the 2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), New Orleans*, 2015: 1-4.
- [18] ZHANG J Y, SHI J L, QI D C, *et al.* Recent progress on the electronic structure, defect, and doping properties of Ga₂O₃ [J]. *APL Mater.*, 2020, 8(2): 020906.
- [19] XU Y, AN Z Y, ZHANG L X, *et al.* Solar blind deep ultraviolet β -Ga₂O₃ photodetectors grown on sapphire by the Mist-CVD method [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(9): 2941-2947.
- [20] JIAO T, CHEN W, YU H, *et al.* Self-powered flexible UV photodetectors based on MOCVD-grown Ga₂O₃ films on mica [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2023, 165: 107706.
- [21] ZHUO R R, WU D, WANG Y G, *et al.* A self-powered solar-blind photodetector based on a MoS₂/ β -Ga₂O₃ heterojunction [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(41): 10982-10986.
- [22] ZHAO B, WANG F, CHEN H Y, *et al.* An Ultrahigh responsivity (9.7 mA·W⁻¹) self-powered solar-blind photodetector based on individual ZnO-Ga₂O₃ heterostructures [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(17): 1700264.
- [23] ZHANG D, ZHENG W, LIN R C, *et al.* Ultrahigh EQE (15%) solar-blind UV photovoltaic detector with organic-inorganic heterojunction *via* dual built-in fields enhanced photogenerated carrier separation efficiency mechanism [J]. *Adv.*

- Funct. Mater.*, 2019, 29(26): 1900935.
- [24] ZHANG D, LIN W M, LIU S X, *et al.* Ultra-robust deep-UV photovoltaic detector based on graphene/(AlGa)₂O₃/GaN with high-performance in temperature fluctuations [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(51): 48071-48078.
- [25] ZHANG D, DU Z, MA M H, *et al.* Enhanced performance of solar-blind ultraviolet photodetector based on Mg-doped amorphous gallium oxide film [J]. *Vacuum*, 2019, 159: 204-208.
- [26] YU J G, NIE Z Z, DONG L P, *et al.* Influence of annealing temperature on structure and photoelectrical performance of β-Ga₂O₃/4H-SiC heterojunction photodetectors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 798: 458-466.
- [27] YU J G, DONG L P, PENG B, *et al.* Self-powered photodetectors based on β-Ga₂O₃/4H-SiC heterojunction with ultra-high current on/off ratio and fast response [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 821: 153532.
- [28] WU H S, ZHANG T, SHEN L Y, *et al.* Interfacial engineering of SnS/Ga₂O₃ heterojunction by SnO for a high-performance self-powered solar-blind UV photodetector [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 9(24): 2200851.
- [29] WU C, QIU L L, LI S, *et al.* High sensitive and stable self-powered solar-blind photodetector based on solution-processed all inorganic CuMO₂/Ga₂O₃ pn heterojunction [J]. *Mater. Today Phys.*, 2021, 17: 100335.
- [30] JIAO T, DANG X M, CHEN W, *et al.* Self-powered Schottky barrier photodiodes based on homoepitaxial Ga₂O₃ film [J]. *Mater. Lett.*, 2023, 349: 134847.
- [31] PENG B, YUAN L, ZHANG H P, *et al.* Fast-response self-powered solar-blind photodetector based on Pt/β-Ga₂O₃ Schottky barrier diodes [J]. *Optik*, 2021, 245: 167715.
- [32] YANG C, LIANG H W, ZHANG Z Z, *et al.* Self-powered SBD solar-blind photodetector fabricated on the single crystal of β-Ga₂O₃ [J]. *RSC Adv.*, 2018, 8(12): 6341-6345.
- [33] LIU Y X, DU L L, LIANG G D, *et al.* Ga₂O₃ field-effect-transistor-based solar-blind photodetector with fast response and high photo-to-dark current ratio [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2018, 39(11): 1696-1699.
- [34] 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.
- [35] LI X X, ZENG G, LI Y C, *et al.* Highly sensitive and stable β-Ga₂O₃ DUV phototransistor with local back-gate structure and its neuromorphic application [J]. *Nano Res.*, 2022, 15(10): 9359-9367.
- [36] KAUR D, KUMAR M. A strategic review on gallium oxide based deep-ultraviolet photodetectors: recent progress and future prospects [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(9): 2002160.
- [37] CHEN Y P, LIANG H W, XIA X C, *et al.* Effect of growth pressure on the characteristics of β-Ga₂O₃ films grown on GaAs (100) substrates by MOCVD method [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2015, 325: 258-261.
- [38] JI X Q, YUE J Y, QI X H, *et al.* Determination of type-II band alignment β-Ga₂O₃/GaAs heterojunction interface by X-ray photoelectron spectroscopy [J]. *J. Appl. Phys.*, 2021, 130(7): 075301.
- [39] HU J Q, YU B, ZHOU J. New generation beta-gallium oxide nanomaterials: growth and performances in electronic devices [J]. *Adv. Eng. Mater.*, 2023, 25(19): 2300688.
- [40] KONG W Y, WU G A, WANG K Y, *et al.* Graphene-β-Ga₂O₃ heterojunction for highly sensitive deep UV photodetector application [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(48): 10725-10731.
- [41] PARK S, PARK T, PARK J H, *et al.* Ag₂O/β-Ga₂O₃ heterojunction-based self-powered solar blind photodetector with high responsivity and stability [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(22): 25648-25658.
- [42] QIN Y, LI L H, ZHAO X L, *et al.* Metal-semiconductor-metal ε-Ga₂O₃ solar-blind photodetectors with a record-high responsivity rejection ratio and their gain mechanism [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(3): 812-820.
- [43] GUO D Y, SU Y L, SHI H Z, *et al.* Self-powered ultraviolet photodetector with superhigh photoresponsivity (3.05 A/W) based on the GaN/Sn:Ga₂O₃ pn junction [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(12): 12827-12835.



党新明(1997-),男,陕西西安人,硕士研究生,2019年于西安邮电大学获得学士学位,主要从事宽禁带半导体材料的研究。

E-mail: dangxm21@mails.jlu.edu.cn



董鑫(1980-),男,吉林长春人,博士,教授,2008年于大连理工大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料及器件的研究。

E-mail: dongx@jlu.edu.cn