

DOI:10.16136/j.joel.2022.11.0083

一种柔性自供电 Ga_2O_3 基日盲光电探测器的设计及性能研究

邢志文^{1,2}, 常裕鑫¹, 张晓龙¹, 刘爱萍¹, 王顺利^{1,2*}

(1. 浙江理工大学 物理系 光电材料与器件中心 浙江省光场调控技术重点实验室, 浙江 杭州 310018; 2. 金华紫芯科技有限公司, 浙江 金华 321015)

摘要:近年来,氧化镓(Ga_2O_3)日盲光电探测器因其高灵敏度和低虚警率及广泛的应用前景,受到了科学家们的高度关注。为了满足现代社会对低损耗、环保、高集成、轻便和柔性器件的需求,可自供电的柔性器件备受关注。然而,到目前为止, Ga_2O_3 基柔性自供电光电探测器鲜有报道。本文通过原位生长技术在耐高温的柔性衬底玻璃纤维布上生长了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线,并构筑 $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结。在肖特基结的作用下,光生载流子可在无外加偏压下分离和传输,并展现出超低的暗电流(0.2 pA)、高光暗比(~ 500)、快响应时间(0.46/0.41 s)和高探测率(6.8×10^9 Jones)。该探测器也表现出良好的机械性能。结果表明, $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结探测器在深紫外探测器领域具有广阔的应用前景,为柔性自供电探测技术的发展提供了新的思路。

关键词:光电探测器; Ga_2O_3 纳米线; 肖特基结; 柔性; 自供电

中图分类号: TN206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)11-1127-07

Preparation and properties of self-powered flexible solar-blind photodetectors based on Ga_2O_3

XING Zhiwen^{1,2}, CHANG Yuxin¹, ZHANG Xiaolong¹, LIU Aiping¹, WANG Shunli^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Optical Field Manipulation of Zhejiang Province, Center for Optoelectronics Materials and Devices, Department of Physics, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 2. Jinhua Zixin Technology Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang 321015, China)

Abstract: Owing to its high photosensitivity and high accurate alarm rate, gallium oxide based solar blind photodetectors attract much attention in military and civilian fields. To meet the requirements of the modern device, gallium oxide based photodetector desired to be flexible and self-powered. However, there are few reports about Ga_2O_3 self-powered flexible photodetectors. In this work, we grew $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanowire on a flexible glass fiber fabric substrate and constructed an $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky junction. Thanks to the build in field, the $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ photodetector can work without an extra power. Meanwhile, the photodetector exhibited an ultra-low dark current (0.2 pA at 0 V), a high light-to-dark ratio (~ 500), a fast response speed (0.46/0.41 s) and a high detectivity of 6.8×10^9 Jones. The device also exhibited good mechanical properties. The results show that $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky junctions have promising applications in the field of deep-UV detectors and provide a new idea for the development of flexible self-powered detection technology.

Key words: photodetector; Ga_2O_3 nanowires; Schottky junction; flexible photodetector; self-powered

* E-mail: slwang@zstu.edu.cn

收稿日期: 2022-03-20 修订日期: 2022-03-27

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY20F040005)和浙江理工大学科研启动基金(20062224-Y)资助项目

1 引言

由于不受太阳光背景的影响,日盲深紫外光电探测器可以全天候工作,具有灵敏度高、虚警率低的特点,在众多军用领域(如高保密性的紫外通信、低虚警率的导弹预警跟踪和火箭尾焰探测)及民事领域(如臭氧层空洞检测、高压输运线老化电晕检测、森林火情警报等)中具有广泛的研究前景^[1-3],俨然已是世界各国研究与竞争的焦点。近年来,能源日益紧缺、环境污染严重及考虑到大数据、5G、物联网、智能机器人、智能生活对电子设备高集成、轻便性、柔性和灵敏性的进一步需求^[4],可自供电的柔性器件备受关注。因此研发一种自供电式的柔性日盲深紫外光电探测器迫在眉睫。

目前,铝镓氮($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$)、镁锌氧($\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$)、氧化镓(Ga_2O_3)、金刚石、氮化铝(AlN)等超宽禁带半导体材料常被用于制备日盲深紫外光电探测器^[5,6]。然而,多元氧化物容易发生相分离且缺陷密度高、高质量大面积的金刚石、 AlN 难以获得。而 Ga_2O_3 是一种天然的日盲探测材料,制备技术相对成熟且具有热稳定性好、击穿场强大等优点,成为了研究热点,并取得了令人欣喜的结果。但是,一般高性能的 Ga_2O_3 基光电探测器需要在高温($>800^\circ\text{C}$)下制备,而常用的柔性衬底通常不能在此温度下保持柔性。目前,据笔者所知,鲜有关于柔性自供电 Ga_2O_3 日盲光电探测器的报道。为了解决这一问题,本文采用拉伸强度高、耐高温、耐腐蚀的玻璃纤维布作为衬底,通过原位生长 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线并构筑 $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结,实现了柔性自供电光电探测器的制备。 $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结日盲紫外光电探测器结合了柔性和自供电的特性,在0 V偏压和 $1200\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的254 nm光照下,展现出超低暗电流(0.2 pA)、较高的光暗比(~ 500)以及较快的响应速度(0.46/0.41 s),同时该探测器在一定的弯曲条件下能保持电流稳定,在可穿戴和便携式日盲光电探测领域具有广泛的应用前景。

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

硝酸镓水合物($(\text{GaNO}_3)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)购于上海阿拉丁试剂有限公司,无水乙醇、丙酮购于浙江高晶精细化工有限公司,对苯醌、氢氧化钾购于浙江汉诺化工科技有限公司,去离子水实验室自制,导电纤维布购于上海谱振生物科技有限公司。

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线结构与形貌用JEM-2100透射电子显微镜、D8 DISCOVER X射线衍射仪、U-3900紫外可见分光光度计、HITACHI S-4800扫描电子显微镜、K-Alpha X射线光电子能谱仪分析。光电性能通过Keithley 4200半导体测试仪来测试。

2.2 Ga_2O_3 纳米线的合成及日盲光电探测器的制备

2.2.1 Ga_2O_3 纳米线的合成

依次用丙酮、无水乙醇、去离子水超声处理10 min玻璃纤维布, N_2 气氛吹干并置于 60°C 的真空烘箱中干燥12 h;以Ar气作为保护气体,利用射频磁控溅射技术在 10^{-4} Pa 的真空条件下,沉积约10 nm厚的Au薄膜;预热 60°C 加热台,吸管吸取约25 mg的液态镓滴涂在衬底上,使用聚二甲基硅氧烷均匀附着;样品放于刚玉坩埚并置于石英管式炉中心位置,通入 N_2 和 O_2 混合气体,升温至 700°C ,待反应10 h后,可观察到纤维布表面出现白色蓬松纳米线团状产物。

2.2.2 器件的制备

用刀片刮开部分 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线露出底部金属Ga作为底部电极,并在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线上滴覆Ag电极作为上电极。Ag电极与 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线成肖特基接触。

3 结果与讨论

一维纳米线材料具有一定方向的取向特性,被认为是定向电子传输的理想材料,因集成了优异的光、热、电、磁、力等物理性能成为研究热点,并且纳米线结构具有一定的柔性,被广泛用于柔性电子器件中^[7,8]。为了获得高质量的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线,本文首先研究了 Ga_2O_3 纳米线的生长过程中,生长温度、时间对其形貌和结构的影响。

图1为 N_2 氛围下,生长时间5 h,不同温度下制备的 Ga_2O_3 纳米线的SEM(scanning electron microscope)图,可以看到,随着生长温度的升高,纳米线长度明显增长,“草丛状”愈发明显。生长温度为 750°C 时,未形成成核点,表面液态Ga未完全反应。当处于高于 800°C 的高温环境中,管式炉内蒸汽压诱导纳米线二次形核,化学气相沉积得以快速进行,得到交织缠绕较为均匀的纳米线结构。同时,当温度进一步升高到 900°C ,发现生长出少量纳米带结构,这是因为蒸汽压过于饱和,侧壁方向形成新的成核点,“线”过度生长成为“带”结构^[9]。图2所示为 N_2 气氛中,于 850°C 下不同反应阶段制备的 Ga_2O_3 纳米线的SEM图。随着生长时间的延长,液态Ga

逐渐消失,纳米线的直径出现明显增长,从 100—600 nm 不等。同时,过长的沉积时间会导致过度生长,并伴随纳米带的出现。综上,本文选择了 850 °C,生长 5 h 的样品来制备光电探测器。

如图 3(a)所示,在 850 °C 下生长 5 h 的样品展现出的衍射峰分别对应于单斜晶系的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的 (-201) 、 (-401) 、 (-111) 、 (002) 、 (111) 、 (-111) 、 (-311) 、 (403) 晶面(JCPDS Card no. 43-1012),表明产物是高纯度单斜相的 Ga_2O_3 纳米线^[10]。从图 3(b)的 TEM 测试结果中可观察到纳米线直径约为 200 nm,相邻晶格条纹间距为 0.254 nm,与 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的 (111) 晶面对应。EDS(energy dispersive spectrometer)能谱分析图 3(c)表明,制备的纳米线除含有微量 Au, Si 元素之外,未发现其他杂质,且含有的 Ga 和 O 原子比例约为 2 : 3。图 4(a)为 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线的 UV-Vis 吸收光谱图,插图为所对应的带隙图。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的吸收边约为 250 nm,对应于日盲区。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光学带隙约为 4.66 eV,与文献报道结果一致^[11,12]。XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)测试结果如图 4(b)~(d)所示, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线的全谱结果表明:制备样品只存在 Ga 和 O 两种元素,图 4(c)显示为 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线样品 Ga 3d 的高分辨图谱,能量峰中心为 20.4 eV 对应于 Ga^{3+} ,证明了样品中 Ga_2O_3 的存在。图 4(d)对应 O 1s 的高分辨图谱,并可被分为 I 和 II。其中能量峰中心为 530.9 eV 的峰 I 代表晶格中的氧离子,532.1 eV 的峰 II 归属于氧空位区域的

氧离子^[13], II/I 峰面积比分别为 1 : 3.3。

$\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结光电探测器在黑暗下的电流-电压(I - V)曲线是非线性的,如图 5(b)所示,在反向偏压处显示 off 状态电流,在正向偏压处显示 on 状态电流,表现出整流特性。在 254 nm 光照射下,电流明显增大;而在 365 nm 光照射下,电流变化较小。为了解释 $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结光电探测器的机理,该光电探测器的能带图如图 5c 所示。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 与金属银呈欧姆接触。而 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (4.0 eV) 的电子亲和能比金属 Ag (4.6 eV) 的功函数低。因此, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 与 Ag 电极之间形成了肖特基结,并导致价带弯曲,从而在界面上形成肖特基势垒和内建电势,在无外加偏压的情况下,可以有效地将载流子分开。在正向偏压下,由于势垒高度的降低,从肖特基结流向金属的电子增强,因此电流增加。在反向偏压的情况下,从肖特基结到金属的流动的电子可以忽略不计,展现出整流特性。

为了评估光强对光电探测器的影响,本文在 254 nm 不同光强下进行了 I - t 测量,如图 6(a)所示。在 0 V 暗光下电流为 0.2 pA,在光照强度为 1 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 254 nm 光照下电流增加到 1.02 nA,光暗比约为 500。光电流随着光强的增加而增加,这是因为在高光强下,光吸收层产生更多的电子-空穴对,因此光电流就越大。光电流和光密度之间的函数关系如图 6(b)所示,结果显示该光电探测器的光电流随着光功率的增加呈线性增加。图 6(c)为

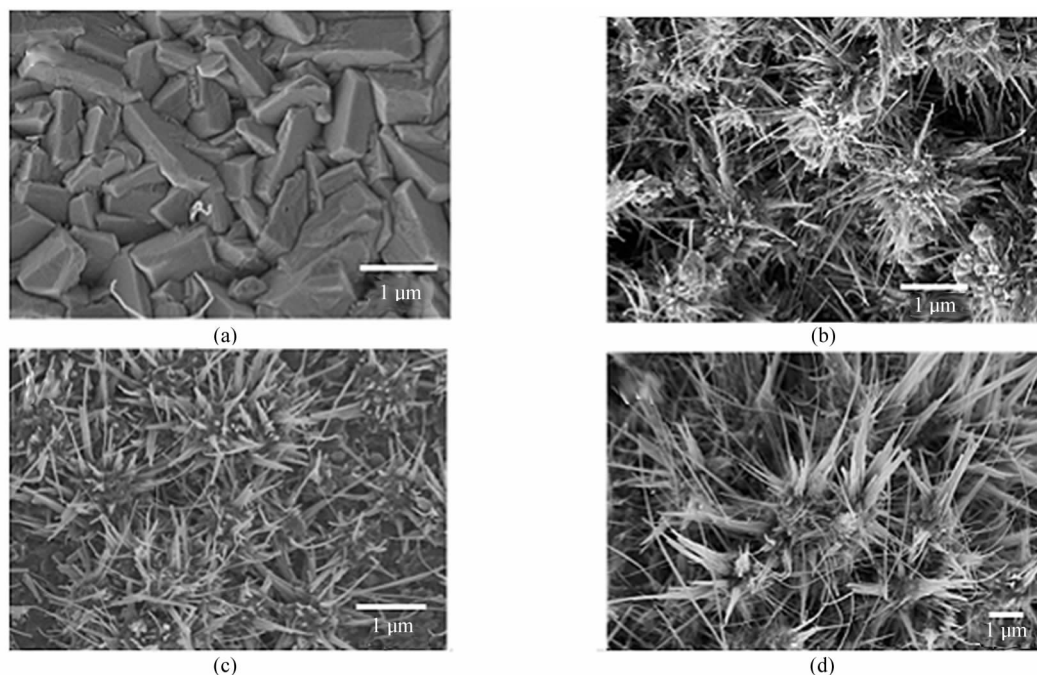


图 1 不同温度生长的 Ga_2O_3 纳米线的 SEM 形貌图:(a) 750 °C ; (b) 800 °C ; (c) 850 °C ; (d) 900 °C

Fig. 1 SEM images of Ga_2O_3 nanowires with various growth temperatures:(a) 750 °C ; (b) 800 °C ; (c) 850 °C ; (d) 900 °C

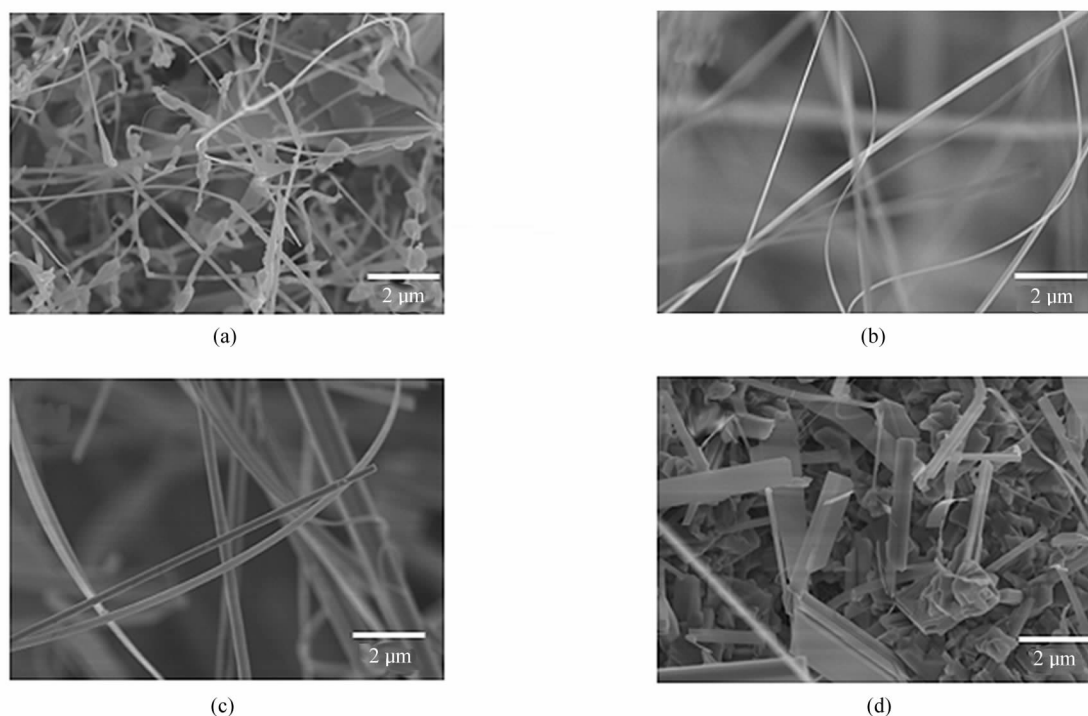


图2 不同时间生长的 Ga_2O_3 纳米线的 SEM 形貌图:(a) 2 h; (b) 5 h; (c) 8 h; (d) 10 h

Fig. 2 SEM images of Ga_2O_3 nanowires prepared at various time:(a) 2 h; (b) 5 h; (c) 8 h; (d) 10 h

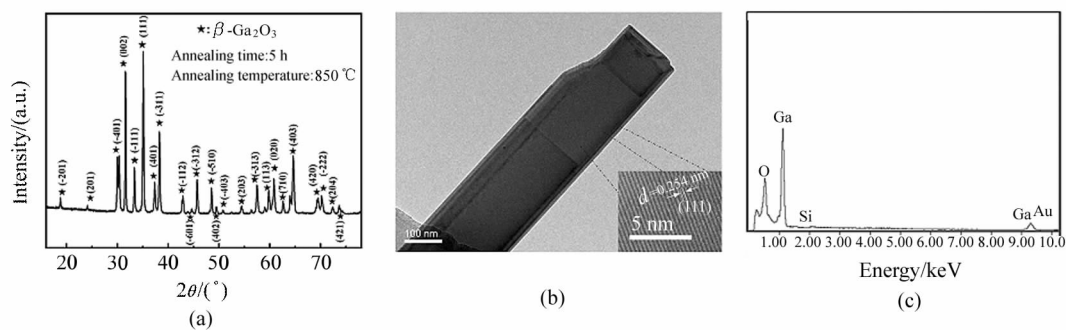
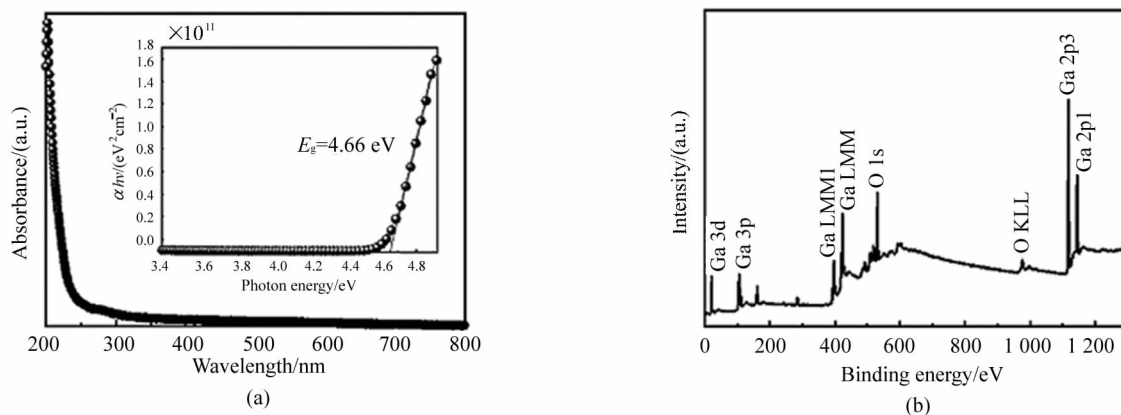


图3 850 °C 下生长 5 h 的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$:(a) XRD 图; (b) TEM 图和 (c) EDS 谱

Fig. 3 (a) XRD image, (b) TEM images and (c) EDS spectra of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanowires annealed at 850 °C for 5 h



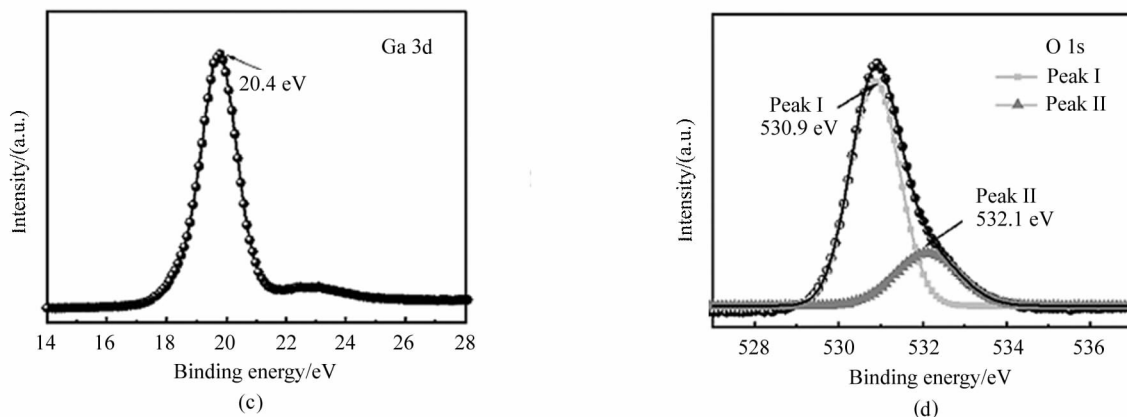


图 4 (a) Ga_2O_3 纳米线的紫外可见吸收谱,插图为归一化的带隙图;
(b) Ga_2O_3 纳米线的 XPS 谱全谱; (c) Ga 3d 谱; (d) O 1s 谱

Fig. 4 (a) UV-Vis absorption spectrum of Ga_2O_3 nanowires, where illustration shows the normalized band gap diagram;
(b) XPS full spectrum of Ga_2O_3 nanowires; (c) Ga 3d; (d) O 1s

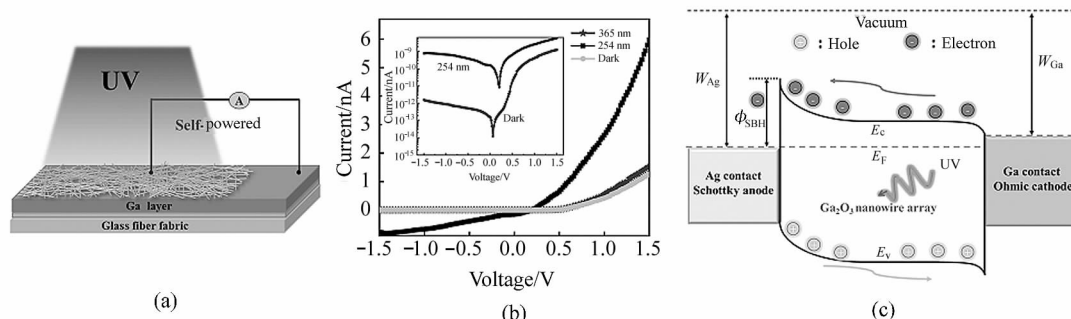


图 5 (a) 器件结构图; (b) 黑暗、365 nm 和 254 nm 光照下,日盲光电探测器的 I - V 特性曲线;
(c) $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线(自供电)日盲光电探测器的能带示意图

Fig. 5 (a) Device structure diagram; (b) I - V characteristics curve of the solar blind photodetector in dark, 365 nm and 254 nm light illumination; (c) The energy diagrams of $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanowire array photovoltaic (self-powered) solar blind photodetector

器件在 254 nm 光照下,施加不同偏压对应的 I - t 曲线,光暗电流随着偏压的增大而增加,这是因为增加偏压会导致电子漂移速度增加,界面态更多电子得以释放,这些电子获得了能穿过金属-半导体界面势垒的动能,光电流迅速增加。为了更详细地研究 $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结光电探测器的光电性能,本文通过双指数松弛方程来拟合 0 V 偏压下的光响应曲线的电流上升和下降过程^[14],其中 I_0 代表稳态下的光电流, A, B 为常数, τ_1 和 τ_2 表示弛豫时间常数。

$$I = I_0 + Ae^{-t/\tau_1} + Be^{-t/\tau_2}. \quad (11)$$

半导体光响应是空穴-电子对分离、俘获以及复合的复杂过程,其中快速响应是因为光源变化瞬间载流子能够瞬时变化,而缓慢响应则与纳米线中的缺陷捕获和释放载流子相关^[15]。拟合计算得到 0 V 偏压下上升响应时间 τ_r 为 0.46 s,衰减响应时间 τ_d 为 0.41 s。

响应率(R)是一个评估光电探测器的重要参数,可以通过以下公式计算: $R = (I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}) / (PS)$, I_{photo} 和 I_{dark} 分别是光电流和暗电流, P 是光强度, S 是光电探测器的有效面积^[16]。如图 6(e)所示,在零偏压下 $1200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 254 nm 光照下,该光电探测器的响应度达到 $18.2 \mu\text{A}/\text{W}$ 。光电探测器的响应率随着电压的增加而增加,在外加偏压下,光生电子-空穴对复合的可能性降低。对弱光的探测能力是探测器的另一个重要指标,通常用 detectivity (D)来衡量^[17]。如图 6(f)所示, D 随着光强的增加而减小。当光强为 $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,最大 D 值为 6.8×10^9 Jones,展示出优异的信号检测能力。NEP(noise equivalent power)反应探测器的灵敏度,表示单位频率产生信噪比 1 的输入照明功率^[18]。最大 NEP 值可达 $2.1 \times 10^{-11} \text{ W}/\text{Hz}^{1/2}$,展示出对光信号良好的敏感性。

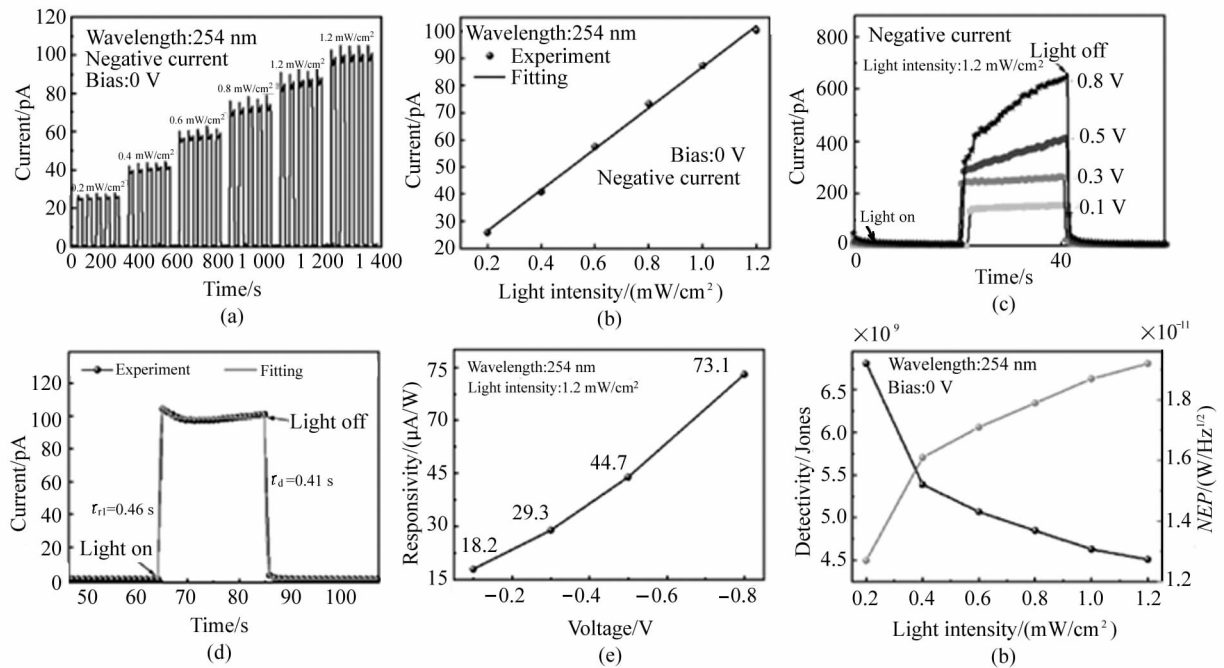


图6 (a) 在 0 V 不同强度的 254 nm 光照下光电探测器的 $I-t$ 曲线; (b) 光电流与光强度的关系;

(c) 在 254 nm 光照下, 不同偏压下光电探测器的 $I-t$ 曲线;

(d) 在 1.2 mW/cm^2 光照强度 254 nm 光照下, 光电探测器响应的上升和衰减时间; (e) 光响应度与偏压的关系;

(f) 光电探测器的探测率和 NEP 与光强的关系

Fig. 6 (a) $I-t$ curves of photodetector at 0 V under 254 nm light illumination with various intensities;

(b) The relationship between photocurrent and illumination intensity;

(c) $I-t$ curves of photodetector at various bias under 254 nm light illumination;

(d) Rising and decay time of the photodetector response under 254 nm illumination with an intensity of 1.2 mW/cm^2 ;

(e) The relationship between photo responsivity and bias;

(f) Detectivity and NEP of photodetector with various illumination intensity

最后本文测试了 $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结光电探测器的机械性能。不同弯曲半径下的 $I-V$ 、 $I-t$ 曲线

如图 7 所示($R_1=12 \text{ mm}$, $R_2=10 \text{ mm}$, $R_3=8 \text{ mm}$), 结果表明不同弯曲条件下的电流几乎没有发生变

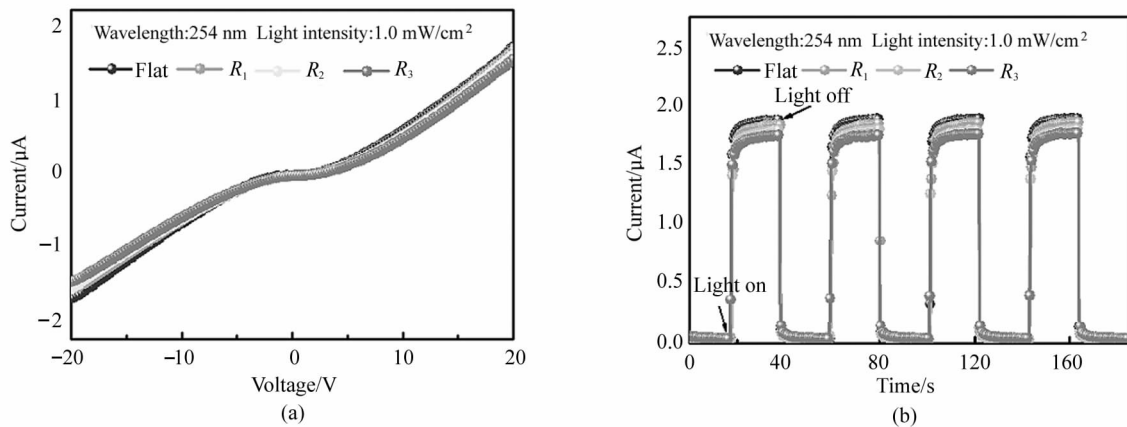


图7 器件在平面和不同弯曲半径下的(a) $I-V$ 特性曲线和(b) $I-t$ 曲线(254 nm 光照下)

Fig. 7 (a) $I-V$ characteristics and (b) $I-t$ curves of device

(under 254 nm light illumination) at flat and different bending radiuses

化,表明该探测器具有良好的柔性。

4 结 论

本文在柔性玻璃纤维布衬底上原位生长了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米线,研究了腔体温度和生长时间对纳米线形貌的影响,设计并制作了一种基于 $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结纳米线的柔性自供电日盲深紫外光电探测器。该探测器展现出自供电特性和超低的暗电流(在 0 V 暗光下电流为 0.2 pA)。在 0 V 偏压及光照强度为 $1.0 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 的 254 nm 光照射下,探测器展现出较高的光暗比(~ 500)以及较快的响应速度(0.46/0.41 s),噪声等效功率和探测率分别达到 $2.1 \times 10^{-11} \text{ W}/\text{Hz}^{1/2}$ 和 $6.8 \times 10^9 \text{ Jones}$,同时器件还展现出良好的机械性能。研究结果表明, $\text{Ag}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结在深紫外探测器领域有着广阔的应用前景,为柔性自供电探测技术的发展提供了新的思路。

参考文献:

- [1] WU C, GUO D Y, ZHANG L Y, et al. Systematic investigation of the growth kinetics of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ epilayer by plasma enhanced chemical vapor deposition[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116: 072102.
- [2] ZHUANG W C, ZHANG J, LI Q T, et al. Research progress on preparation of gallium oxide nanomaterials and its application in photoelectric detection[J]. Journal of Crystal Growth, 2020, 49(12): 2376-2382.
- [3] GUO D Y, LI P G, CHEN Z W, et al. Ultra-wide bandgap semiconductor of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ and its research progress of deep ultraviolet transparent electrode and solar-blind photodetector[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(7): 078501.
- [4] AFZAL A. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanowires and thin films for metal oxide semiconductor gas sensors: Sensing mechanisms and performance enhancement strategies[J]. Journal of Materials, 2019, 5(4): 542-557.
- [5] WU C, HE C R, GUO D Y, et al. Vertical $\alpha/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ phase junction nanorods array with graphene silver nanowire hybrid conductive electrode for high-performance self-powered solar-blind photodetectors[J]. Materials Today Physics, 2020, 12: 100193.
- [6] AIELLO A, WU Y, MI Z, et al. Deep ultraviolet monolayer GaN/AlN disk-in-nanowire array photodiode on silicon[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116: 061104.
- [7] LI Y Q, ZHANG D, JIA L, et al. Ultrawide-bandgap 6.14 eV $(\text{AlGa})_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ heterostructure designed by lattice matching strategy for highly sensitive vacuum ultraviolet photodetection[J]. Science China Materials, 2021, 64: 3027-3036.
- [8] DU J Y, XING J, GE C, et al. Highly sensitive and ultrafast deep UV photodetector based on a $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanowire network grown by CVD[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(42): 425105.
- [9] SHAHID M, LI T J, ZHANG M F, et al. Transparent ultraviolet photodetectors based on Ga_2O_3 electrospun nanowires[J]. Solid State Phenomena, 2018, 281: 710-715.
- [10] WANG S L, SUN H, WANG Z, et al. In situ synthesis of monoclinic $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanowires on flexible substrate and solar-blind photodetector[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 787: 133-139.
- [11] 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.
- [12] XIE C, LU X T, MA M R, et al. Catalyst-free vapor-solid deposition growth of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanowires for DUV photodetector and image sensor application[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(24): 1901257.
- [13] GUO D Y, LIU H, LI P G, et al. Zero-power-consumption solar-blind photodetector based on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{NSTO}$ Heterojunction[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9: 1619-1628.
- [14] LIU Z, WANG X, LIU Y Y, et al. High-performance ultraviolet solar-blind photodetector based on $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky photodiode[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(44): 13920-13929.
- [15] ZOU R J, ZHANG Z, LIU Q, et al. High detectivity solar-blind high-temperature deep-ultraviolet photodetector based on multi-layered (100) facet-oriented $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanobelts[J]. Small, 2014, 10(9): 1848-1856.
- [16] CHEN K, HE C R, GUO D Y, et al. Low-voltage-worked photodetector based on $\text{Cu}_2\text{O}/\text{GaOOH}$ shell-core heterojunction nanorod arrays[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 755: 199-205.
- [17] LI Y Q, ZHANG D, LIN R C, et al. Graphene interdigital electrodes for improving sensitivity in a $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Zn}$ deep-ultraviolet photoconductive detector[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 11(1): 1013-1020.
- [18] QIAO B S, ZHANG Z Z, XIE X H, et al. Avalanche gain in metal-semiconductor-metal Ga_2O_3 solar-blind photodiode[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(30): 18516-18520.

作者简介:

王顺利 (1984—),男,教授,硕士生导师,主要从事超宽禁带半导体材料的生长、日盲探测器的制备及应用等方面的研究。