

# 基于 ZnO 微米棒/碳纤维纸的自供电紫外光电探测器研究\*

张菊花<sup>1</sup>, 伍倩<sup>1</sup>, 盛习福<sup>2</sup>, 牛朵朵<sup>3</sup>

(1. 重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆市涪陵实验中学, 重庆 涪陵 408000;  
3. 重庆文理学院数学与人工智能学院, 重庆 永川 402160)

**摘要:**利用水热法在碳纤维纸(CFP)基底上成功生长了沿(100)方向的 ZnO 微米棒材料,并通过 X 射线衍射、拉曼光谱以及场发射扫描电子显微镜对该材料晶体结构和形貌进行了表征分析。在此基础上,构筑了一种基于 ZnO/CFP 复合材料的光电化学自供电紫外光电探测器(PEC-PD),详细分析了它的光电性能。实验结果表明:ZnO 微米棒材料晶体质量优异,具有较高的结晶度。所制备的 ZnO/CFP PEC-PD 在紫外光照下表现出优异的自供电响应性能,包括显著的光暗电流比( $8.82 \times 10^2$ )、高响应度( $7.34 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ )、快速响应时间(上升时间和下降时间分别为 0.17 s 和 0.18 s)、良好的波长选择性和稳定性。水热法制备的 ZnO/CFP PEC-PD 在自供电紫外探测领域具有广阔的应用潜力,为高性能自供电光电探测器的开发提供参考。

**关键词:**ZnO 微米棒;碳纤维纸;自供电;光电化学型光电探测器

**中图分类号:**O74;TQ132.4<sup>+1</sup>

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2025)06-0116-07

紫外光是自然界中辐射能量最强的光线之一,它的波长范围为 10~400 nm,能量分布范围为 3.1~124 eV。根据波长不同,紫外光可分为 UVA(320~400 nm)、UVB(280~320 nm)和 UVC(10~280 nm)<sup>[1]</sup>,其中:UVA 具有最强的穿透能力,能量损耗较小,能够直达地面;UVB 的强度则与臭氧层厚度密切相关,而 UVC 则因完全被臭氧层吸收而形成日盲区(200~280 nm)<sup>[2]</sup>。过量的紫外辐射会诱发机体内活性氧大量增加,引起皮肤癌、白内障等疾病,并对人类生存环境构成威胁。因此,开发高灵敏度和高性能的紫外探测器对人类健康及环境监测具有重要意义。

近些年来,光电化学自供电紫外光电探测器(PEC-PD)因具备无需外部供电、功耗低、灵敏度高等特点而备受关注。这类器件利用入射紫外光信号直接供电,在军事、医疗、民用等领域均展现出广泛应用前景,例如导弹预警、紫外通讯、紫外成像、太阳紫外辐射监测和火灾探测<sup>[2-8]</sup>。与传统探测器相比,自供电探测器对能源的依赖程度明显降低,是未来紫外探测领域的重要发展方向之一。宽禁带半导体材料因具有带隙宽、抗辐射能力强、热稳定性好等优点,为高性能紫外探测器的开发提供了理想的材料选择<sup>[9-13]</sup>。近些年来,基于 ZnO 的光电化学型紫外光探测器在材料设计和结构优化方面取得了明显进展<sup>[4,14-17]</sup>。通过掺杂策略,如 Ga 掺杂 ZnO 纳米线,有效提高了材料的载流子浓度及界面电荷分离能力<sup>[14]</sup>;利用 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光吸收层构建 ZnO 微米棒材料异质结构,拓展了光响应范围<sup>[15]</sup>;通过混维异质结(TiO<sub>2</sub>/ZnO/Ag)的构建,提升了光生载流子的生成和分离效率<sup>[16]</sup>。此外,将 ZnO 与三维碳纤维纸(CFP)复合或与 p 型 NiO 形成核壳异质结构,不仅优化了界面电荷传输路径,还改善了材料的比表面积及反应动力学性能<sup>[4,17]</sup>。这些研究从材料掺杂、异质结构建到三维复合结构设计,探索了多种有效策略,为 ZnO 基 PEC-PD 的发展提供了新的思路。

本研究采用水热法直接在三维 CFP 基底上制备 ZnO 微米棒材料。通过 X 射线衍射(XRD)和拉曼光谱(Raman)表征 ZnO 微米棒的晶体结构,并利用光电化学测试系统详细分析它的光电化学性能。结果表明,该 ZnO/CFP 核壳结构光电化学探测器具有典型的 UVA 响应特性、稳定的自供电性能和良好的波长选择性。与传统制备方法相比,本研究提出的工艺具有简单、低成本、高重复性的优势,有望为开发高性能自供电 UVA 探测器

\* 收稿日期:2025-10-15 网络出版时间:2026-01-09T09:52

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 12304102);重庆市自然科学基金面上项目(No. CSTB2023NSCQ-MSX0479)

第一作者简介:张菊花,女,高级实验师,研究方向为宽禁带半导体材料与器件,E-mail:zjh@cqnu.edu.cn;通信作者简介:牛朵朵,女,讲师,E-mail:cqwl\_ndd@cqwu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260108.1707.020

提供新的技术路径和理论支持。

## 1 实验部分

首先,按照 1:1 的物质的量之比制备了二水乙酸锌( $C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$ )和六次甲基四胺( $C_6H_{12}N_4$ )的反应溶液。具体步骤为:称取 0.987 6 g 的二水乙酸锌和 0.630 9 g 的六次甲基四胺,分别溶解于 150 mL 的一级去离子水(电阻率为  $18.25 M\Omega \cdot cm$ )中,并在磁力搅拌器上各自搅拌 30 min 以确保充分溶解。随后,将这 2 种溶液混合并继续搅拌 30 min,得到浓度为  $0.03 mol \cdot L^{-1}$  的水热反应溶液。接着,将剪裁好的 CFP 基板(尺寸为  $1.0 cm \times 2.2 cm$ )放入装有一级去离子水的烧杯中,使用超声波清洗机振荡清洗 5 min 以去除表面的杂质。清洗完毕后,将 CFP 基板干燥并放入特氟龙瓶中悬浮固定。随后,将之前制备的反应溶液倒入特氟龙瓶中,并将特氟龙瓶装入反应釜中密封。最后,将整个反应釜放入恒温水热箱中,将反应温度设定为  $120 ^\circ C$ 。为了获得不同厚度的 ZnO 微米棒材料,分别设置了 2、4、6、8 和 10 h 的生长时间。

反应结束后,取出样品,用一级去离子水清洗掉样品表面残留的溶液,并将样品放入干燥箱中进行干燥处理。ZnO/CFP 的元素组成和晶体结构采用 Bruker D8 ADVANCE A25 型 X 射线衍射仪(以  $Cu K\alpha$  辐射( $\lambda = 0.154 18 nm$ )作为激发源)和 Horiba LabRAM HR Evolution 型拉曼光谱仪(激发光源为 532 nm 固体激光器)进行测试,表面形貌通过 Zeiss Sigma 500 型场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)进行研究。在构建 PEC-PD 之前,将 ZnO 微米棒加工为光电极。具体的封装工艺如下:首先,将 ZnO/CFP 放置在已经用丙酮、乙醇和去离子水清洗过并用氮气干燥的显微镜载玻片上。然后,使用导电银胶将铜线的一端固定在样品的 CFP 部分(即未生长 ZnO 微米棒的区域)。接着,在 ZnO/CFP 表面相对均匀的部分放置 1 个内径为 6 mm 的四氟乙烯(PTFE)环。随后,用环氧树脂 AB 胶覆盖 ZnO/CFP、PTFE 环和铜线,并在真空中进行硬化处理,以获得 ZnO/CFP 光电极。为了评估测试 ZnO/CFP 光电探测器的光响应行为及光电化学性能,利用电化学工作站 PEC 系统在高 UVA 透射率的三电极石英电池中进行了测试。测试时,使用封装好的 ZnO/CFP 光电极作为工作电极(UVA 感光面积为  $0.282 7 cm^2$ ),铂板(尺寸为  $1.5 \times 1.5 cm^2$ )作为对电极,以及饱和甘汞电极作为参比电极。同时,配制了浓度为  $0.1 mol \cdot L^{-1}$  的  $Na_2SO_4$  水溶液(pH 为 7.0)作为电解液。UVA 光源由波长为 365 nm 的低压灯提供。此外,还使用以 500 W 紫外增强氙灯为光源的测试系统执行了器件在零偏压下的波长相关光响应性测试。所有测量均在室温下进行。

## 2 结果与分析

图 1 阐述了新型光电化学型自供电光电探测器的工作原理,以 ZnO/CFP PEC-PD 为例。当 ZnO/CFP 光电极与  $Na_2SO_4$  电解质溶液接触时,由于电荷分布的差异,会在形成的空间电荷层内产生内置电场。当光线照射到 ZnO 电极上时,那些能量超过带隙的光子会被吸收并激发产生电子-空穴对,而该内置电场能有效地将这些电子-空穴对分离<sup>[4]</sup>。具体而言,光生空穴会扩散至 ZnO 与电解质的界面,参与电解液的氧化过程,即将溶液中的  $OH^-$  在 ZnO/ $Na_2SO_4(aq)$  界面氧化为  $OH^*$  ( $h^+ + OH^- = OH^*$ );与此同时,光生电子则被传输至 CFP 基板上,并通过外部电路流向对电极。在对电极处,这些电子在 Pt/ $Na_2SO_4(aq)$  界面进一步将溶液中的  $OH$  还原为  $OH^-$  ( $e^- + OH = OH^-$ )。这一过程最终形成了一个完整的电流回路,产生了光阳极电流,并赋予了器件自供电的特性<sup>[3]</sup>。简而言之,该器件通过电解液中  $OH^-$  与  $OH^*$  之间的氧化还原反应实现了电路的导通,从而展现出其自供电的性能。

为了研究制备样品的微观结构,对 ZnO/CFP 光电阳极进行了 XRD 测试。XRD 图谱如图 2a 所示,在  $26.4^\circ$  和  $54.3^\circ$  分别出现了强峰和弱峰,这 2 个衍射峰分别对应于 CFP(JCPDS# 26-1080)的(004)和(008)晶面<sup>[18]</sup>。除 CFP 的特征衍射峰外,还观察到 2 个额外的衍射峰,分别位于  $31.62^\circ$  和  $36.25^\circ$ 。其中, $31.62^\circ$  的次高峰对应于六方纤锌矿结构 ZnO(JCPDS# 36-1451)的(100)晶面, $36.25^\circ$  的弱峰则对应于 ZnO 的(101)晶面<sup>[19]</sup>。由衍射结果可知,制备的 ZnO 材料主要沿(100)晶面优先取向生长,仅有少量晶体沿(101)晶面生长。这表明 ZnO 具有较好的取向性。此外,衍射峰形尖锐且无其他杂质峰,表明样品具有较高的结晶度和较高的纯度。为进一步验证 ZnO 材料的晶体结构,进行了 Raman 测试。Raman 结果如图 2b 所示,样品在  $436 cm^{-1}$  处出现强峰,该峰为 ZnO 典型的 E2(high)振动模式,表明样品具有纤锌矿晶体结构<sup>[20]</sup>。该结果与 XRD 测试结果一致,进一步证明制备的 ZnO 材料具有良好的晶体质量和微观结构。图 2c、d 展示了在 CFP 上生长的 ZnO 微观结构图,可以看

出在 CFP 上生长了类似于针状结构的 ZnO 材料,它的长度和直径分别大致在 10 和 1  $\mu\text{m}$ ,长径比为 10 : 1。因此,所制备的 ZnO 为典型的一维微米棒材料。

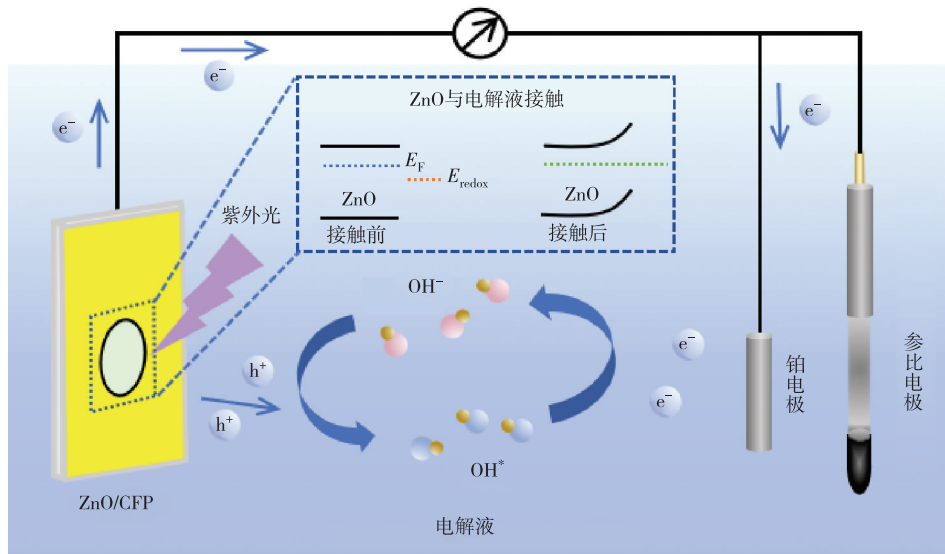
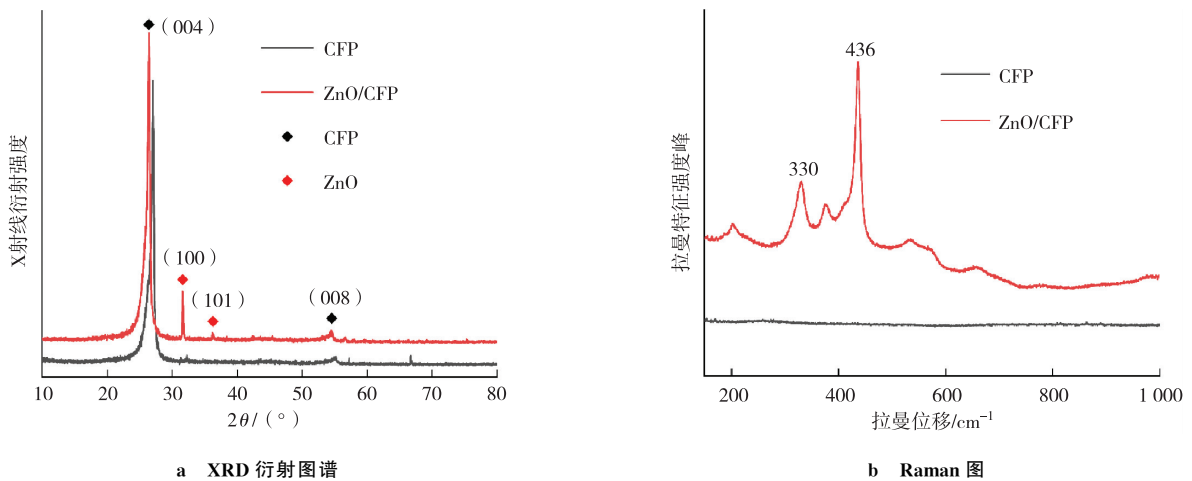


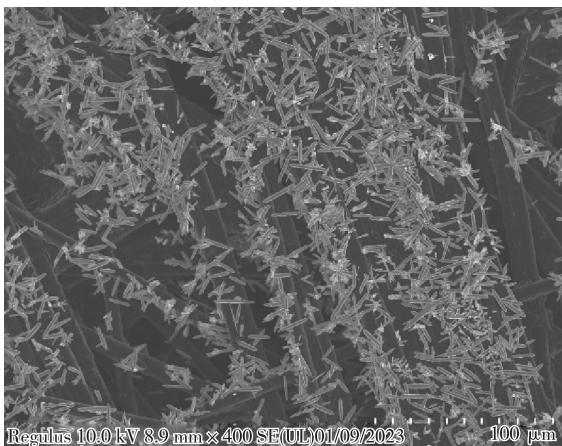
图 1 光电化学型自供电光电探测器机理图

Fig. 1 Mechanism diagram of the self-powered photoelectrochemical photodetector

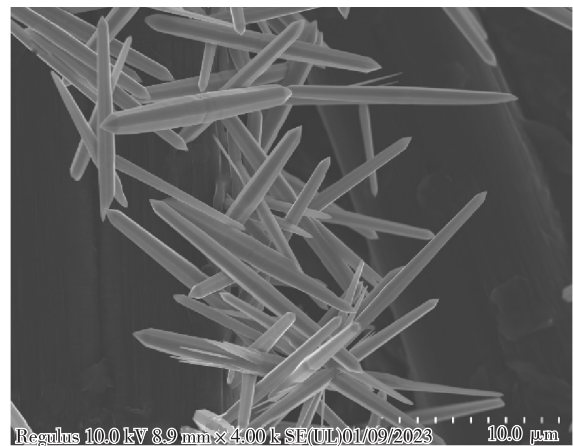


a XRD 衍射图谱

b Raman 图



c SEM 图像



d SEM 图像(局部放大)

图 2 ZnO/CFP 光阳极的结构与形貌表征

Fig. 2 Structural and morphological characterization of the ZnO/CFP photoanode

基于 ZnO/CFP 光阳极,构筑了三电极 PEC-PD,评估了不同生长时间对 ZnO/CFP PEC-PD 自供电特性的影响,如图 3a 所示。明显地,所有 ZnO/CFP PEC-PD 在零偏压下和  $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  光强的 365 nm 光照下都表现出明显的光响应切换行为,这表明不同生长时间的 ZnO/CFP PEC-PD 都具有自供电特性。但是,从图 3a 中可以看出不同生长时间的 ZnO/CFP PEC-PD 的光电流存在着明显差异。图 3b 进一步给出了不同生长时间的 ZnO/CFP PEC-PD 在零偏压、 $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  光强的 365 nm UVA 光照下的光电流与生长时间的曲线。此图更直观地显示出生长周期为 8 h 的 ZnO/CFP PEC-PD 展现出了远超其他器件的光电流。同时,它的 FE-SEM 与 XRD 表征显示 ZnO 微米棒均匀垂直生长、密度适宜,且(002)晶面择优取向明显,可减少载流子复合,协同支撑优异性能。因此,8 h 的生长周期被视为实现最佳性能的关键参数。基于这一发现,本研究选定生长周期为 8 h 的 ZnO/CFP PEC-PD 作为后续研究的重点对象。

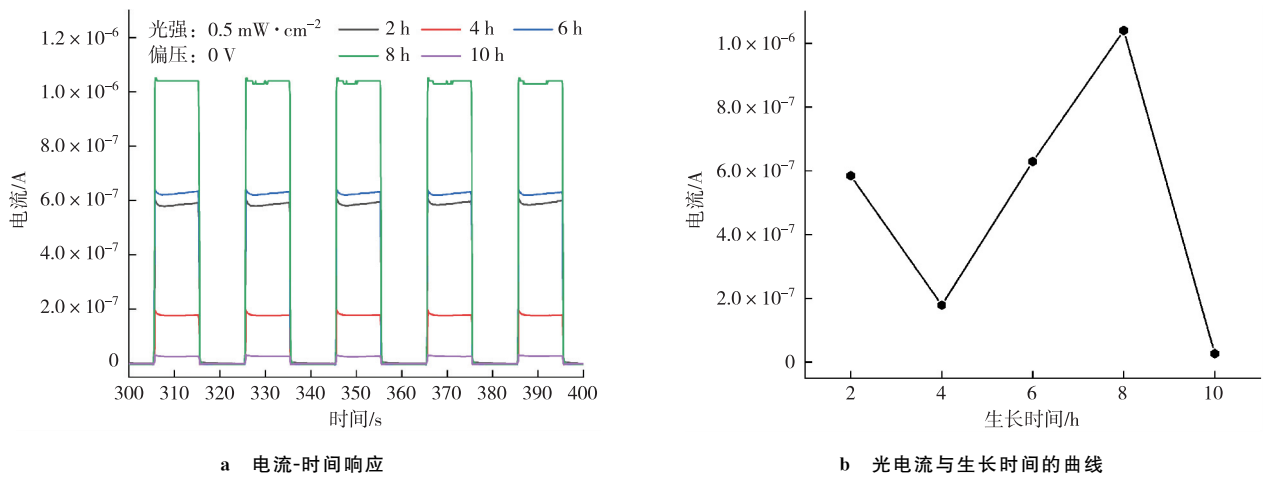


图 3 不同 ZnO 生长时间下 ZnO/CFP PEC-PD 的光电性能

Fig. 3 Photoelectric performance of ZnO/CFP PEC-PD with different ZnO growth times

图 4a 展示了基于 8 h 生长的 ZnO/CFP PEC-PD 在暗态及不同光强 365 nm UVA 光照下的电流-电压曲线。与暗态相比,该器件在 365 nm UVA 光照下表现出明显的光电流,且光电流随着光强的增加而逐渐增大,这表明该器件具有光强依赖性。显然,光电流信号与零偏压下较低的暗电流共同证实了 ZnO/CFP PEC-PD 的自供电能力,意味着基于 ZnO 微米棒材料的 PEC-CD 能够在无外部电源的情况下运行。同时,这也体现了基于 ZnO 微米棒材料的 PEC-CD 的自供电特性。图 4b 为 8 h 生长时间的 ZnO/CFP PEC-PD 在不同波长光照下的光电流与波长关系图(即光谱响应曲线)。由此图可知,该器件对 UVA 有响应,而对可见光基本无响应,显示出良好的波长选择性。

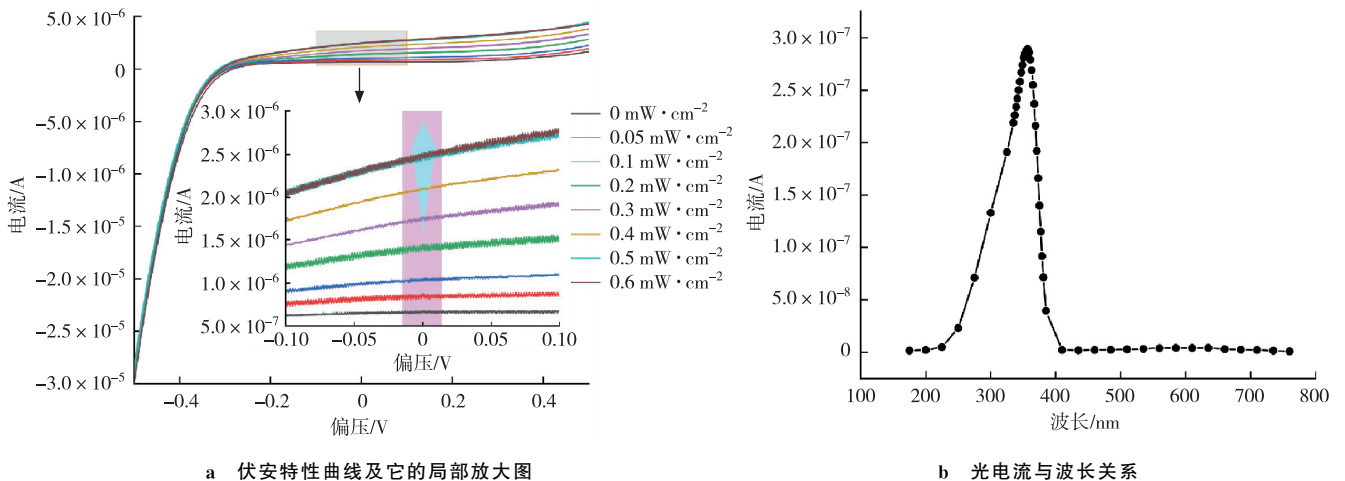


图 4 ZnO/CFP PEC-PD 的光电响应特性

Fig. 4 Photoresponse characteristics of the ZnO/CFP PEC-PD

图 5a 展示了基于 8 h 生长的 ZnO/CFP PEC-PD 在零偏压下,不同光强 365 nm UVA 光照下的电流-时间特性曲线。从该图中可以观察到,当 365 nm UVA 光源以 10 s 的周期开关时,该器件展现出良好的稳定性,并且光电流随光强的增加而明显增加,表明该器件具有明显的光强依赖性。图 5b 显示,光电流与光强之间存在强烈的线性关系。光暗电流比( $V_{\text{PDCR}}$ )定义为器件在光照条件下的电流与暗态电流之比,它的计算公式为<sup>[2]</sup>:

$$V_{\text{PDCR}} = \frac{I_p}{I_d},$$

其中: $I_p$  和  $I_d$  分别表示零偏压下的光电流和暗电流。通过计算,可以发现当光强为  $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  时,零偏压下的光暗电流比高达  $8.82 \times 10^2$ 。响应度( $R$ )是评价光电探测器将入射光转换为电信号能力的重要参数,它的计算公式为<sup>[4]</sup>:

$$R = \frac{\Delta I}{P_{\text{inc}} S}.$$

其中, $\Delta I = I_p - I_d$ ,  $P_{\text{inc}}$  是光照强度,  $S$  是器件的有效光照面积(本研究为  $0.2827 \text{ cm}^2$ )。在零偏压、光强为  $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  的条件下,器件的有效照明区域面积为  $0.2827 \text{ cm}^2$ ,此时计算得出的响应度为  $7.34 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 。图 5c 显示了 ZnO/CFP PEC-PD 在零偏压、 $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  光强下的上升时间和下降时间,分别为 0.17 s 和 0.18 s。图 5d 展示了该器件在零偏压、 $0.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  光强下连续 1 h 的电流-时间响应,证明了 ZnO/CFP PEC-PD 具有良好的稳定性。表 1 对比了本研究构筑的 ZnO/CFP PEC-PD 与已有文献报道的同类器件性能。结果表明,该器件在紫外波段展现出优异的自供电响应性能,同时得益于简单的水热制备工艺,有望为未来开发水下探测提供一定的参考。

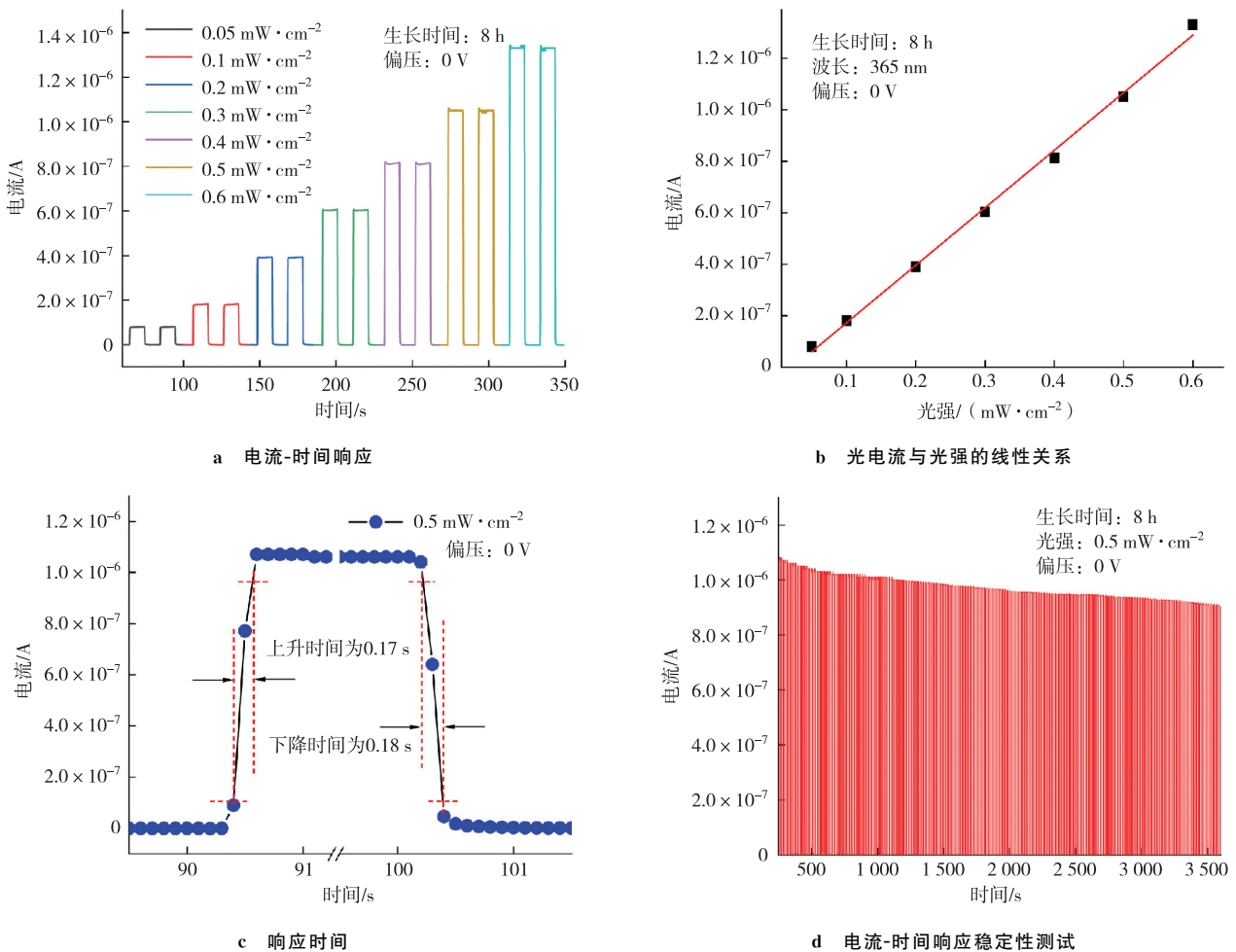


图 5 ZnO/CFP PEC-PD 的自供电性能表征

Fig. 5 Self-powered performance of the ZnO/CFP PEC-PD

表 1 不同光电化学型光电探测器的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of different photoelectrochemical photodetectors

器件结构	波长/nm	响应度 $R/(\text{mA} \cdot \text{W}^{-1})$	上升时间/ms	下降时间/ms	参考文献
ZnO microrod PEC-PD	365	7.34	170	180	本研究
ZnO nanorod PEC-PD	365	0.90	150	170	[21]
ZnO Film PEC-PD	365	31.51	77	49	[17]
ZnO nanorod PEC-PD	365	$\approx 6.00$	—	—	[22]
$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs PEC-PD	254	11.34	1 510	180	[23]
$\alpha/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs PEC-PD	254	5.20	115	293	[24]
$\text{Cr}_2\text{S}_3$ nanosheets PEC-PD	350	0.62	—	—	[25]
$\text{MoTe}_2$ PEC-PD	380~940	0.01	19	26	[26]
GaS nanosheets PEC-PD	380	11.00	12.9	0.013	[27]

### 3 结论

本研究成功利用水热法在 CFP 基底上生长了 ZnO 微米棒材料,并构建了基于 ZnO/CFP 复合材料的 PEC-PD。通过 XRD、Raman 和 FE-SEM 表征技术,确认了 ZnO 微米棒材料的优异晶体质量和较高结晶度。所制备的 ZnO/CFP PEC-PD 在紫外光照射下表现出优异的自供电性能,包括较高的响应度( $7.34 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ )、快速的响应时间(上升时间和下降时间分别为 0.17 和 0.18 s)以及良好的波长选择性和稳定性,证明了 ZnO/CFP PEC-PD 在自供电紫外光探测领域具有广阔的应用前景。本研究为自供电光电探测器的设计与优化提供了新的思路,为未来开发水下成像、水下通讯等潜在应用提供了一定的参考。

#### 参考文献:

- [1] CHEN H Y, LIU K W, HU L F, et al. New concept ultraviolet photodetectors[J]. *Materials Today*, 2015, 18(9): 493-502.
- [2] DING K, ZHANG H, JIANG J L, et al. Balancing carrier dynamics in oxygen-vacancy-tuned amorphous  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin-film self-powered photoelectrochemical-type solar-blind photodetector arrays for underwater imaging[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(43): e2407822.
- [3] YU C X, LI H L, DING K, et al. Flexible and self-powered photoelectrochemical-type solar-blind photodetectors based on Ag nanowires-embedded amorphous  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(18): 2400116.
- [4] TAN G Y, TANG Q X, ZHANG H, et al. ZnO@NiO core-shell heterojunction photoanode modified with NiOOH co-catalyst for high-performance self-powered photoelectrochemical-type UV photodetector[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 681: 161579.
- [5] LIU X, WANG D H, KANG Y, et al. Photovoltage-competing dynamics in photoelectrochemical devices: achieving self-powered spectrally distinctive photodetection[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(5): 2104515.
- [6] WANG D H, LIU X, KANG Y, et al. Bidirectional photocurrent in p-n heterojunction nanowires[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(9): 645-652.
- [7] CHEN H, LIN Z F, QIU H W, et al. High-responsivity natural-electrolyte undersea photoelectrochemical photodetector with self-powered Cu@GaN nanowires network[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(29): 2302872.
- [8] ZHOU J Y, CHEN L L, WANG Y Q, et al. An overview on emerging photoelectrochemical self-powered ultraviolet photodetectors[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(1): 50-73.
- [9] ZHENG Q Q, CHEN L R, LI X D, et al. Boosting the performance of deep-ultraviolet photodetector arrays based on phase-transformed heteroepitaxial  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  films for solar-blind imaging[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(9): 2707-2715.
- [10] YE L J, YU J H, ZHANG H, et al. Carbon-doped ZnO thin films: a transparent conductive oxide for application in solar-blind photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 125: 012104.
- [11] HU T G, ZHAO L X, WANG Y J, et al. High-sensitivity and fast-speed UV photodetectors based on asymmetric nanoporous-GaN/graphene vertical junction[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(9): 8411-8419.
- [12] WANG K T, WANG H L, CHEN C M, et al. High-performance ultraviolet photodetector based on single-crystal integrated self-supporting 4H-SiC nanohole arrays[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(19): 23457-23469.

- [13] CHENG L, WU Y L, CAI W, et al. Diamond immersion photodetector for 213 nm deep-ultraviolet photodetection[J]. *Materials Today Physics*, 2023, 36: 101164.
- [14] TANG Q X, TAN G Y, ZHANG H, et al. Enhanced photoresponse of self-powered ZnO-based photoelectrochemical-type UV photodetectors via Ga-doping for optical communication application[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 972: 172864.
- [15] EROGLU A N, ALTAF C T, DEMIRCI SANKIR N, et al. Patterned ZnO nanorods/indium sulfide based self-powered photoelectrochemical photodetectors[J]. *Optical Materials*, 2024, 148: 114763.
- [16] JIANG X S, FANG T, TAO J J, et al. 1D/2D/0D mixed-dimensional TiO<sub>2</sub>/ZnO/Ag core-shell nanowires for high-performance UV-vis photoelectrochemical photodetectors[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2023, 127(7): 3698-3705.
- [17] XU F Y, YAN W J, PANG D, et al. High-performance photoelectrochemical (PEC) type self-powered ultraviolet photodetectors (PDs) based on three-dimensional ZnO film/carbon fiber paper[J]. *Optical Materials*, 2024, 150: 115185.
- [18] HUANG L J, HU Z R, ZHANG H, et al. A simple, repeatable and highly stable self-powered solar-blind photoelectrochemical-type photodetector using amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films grown on 3D carbon fiber paper[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(32): 10354-10360.
- [19] KATHWATE L H. In-doped ZnO films deposited by modified SILAR method for enhanced ethanol gas sensor application[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(22): 48462-48473.
- [20] TRAN V T, LE M P, PHAM N H, et al. Unraveling the mechanism of photo-induced surface enhanced Raman scattering on ZnO/Au thin films[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 657: 159785.
- [21] MA J Y, GE Y Q, DAI P P, et al. Highly stable and sensitive photoelectrochemical photodetectors based on a ZnO nanorod/monolayer MoS<sub>2</sub> nanosheets heterostructure[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 976: 173315.
- [22] LI M X, LIU J, ZHANG T, et al. Enhanced performance of self-powered ZnO-based PEC type UV photodetectors by loading GQDs to construct heterojunctions[J]. *Materials Research Bulletin*, 2024, 172: 112657.
- [23] HUANG L J, HU Z R, HE X W, et al. Self-powered solar-blind ultraviolet photodetector based on  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorod arrays fabricated by the water bath method[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(7): 2089.
- [24] HU H Z, DENG L P, ZHU Y C, et al.  $\alpha/\beta$  phase junction Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based high-performance self-powered deep ultraviolet photodetectors with Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Ag nanowire hybrid conductive electrode[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 945: 169307.
- [25] SU W J, KUKLIN A, JIN L H, et al. Ultrathin non-van der Waals chromium sulfide; liquid phase exfoliation, characterization, and self-powered photoelectrochemical photodetector application[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(44): 2405752.
- [26] XU X, WANG Y, JI Y Q, et al. High-performance flexible broadband photoelectrochemical photodetector based on molybdenum telluride[J]. *Small*, 2024, 20(27): e2308590.
- [27] LIU J H, ZHOU Y X, SHAO P P, et al. Vertically-aligned GaS nanosheets-based photoelectrochemical photodetector for fast-speed, high-sensitivity, and self-powered UV-vis underwater optical communication[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(2): 2413123.

## Self-Powered Ultraviolet Photodetector Based on ZnO Microrods/Carbon Fiber Paper

ZHANG Juhua<sup>1</sup>, WU Qian<sup>1</sup>, SHENG Xifu<sup>2</sup>, NIU Duoduo<sup>3</sup>

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2. Experimental Middle School of Fuling District, Chongqing, Fuling Chongqing 408000; 3. School of Mathematics and Artificial Intelligence, Chongqing University of Arts and Sciences, Yongchuan Chongqing 402160, China)

**Abstract:** ZnO microrods with (100) orientation were successfully grown on carbon fiber paper (CFP) substrates via a hydrothermal method. The crystal structure and morphology were systematically characterized by X-ray diffraction, Raman spectroscopy, and field-emission scanning electron microscopy. A photoelectrochemical self-powered ultraviolet photodetector (PEC-PD) based on the ZnO/CFP composite was fabricated, and its optoelectronic properties were thoroughly investigated. Results demonstrate that the ZnO Microrods exhibit excellent crystalline quality with high crystallinity. The fabricated ZnO/CFP PEC-PD shows outstanding self-powered photoresponse under UV illumination, including a remarkable photo-to-dark current ratio ( $8.82 \times 10^2$ ), high responsivity ( $7.34 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ ), fast response times (rise time is 0.17 s, fall time is 0.18 s), good wavelength selectivity, and stability. This work proves the great potential of hydrothermally synthesized ZnO/CFP PEC-PDs in self-powered UV detection applications, providing valuable insights for developing high-performance self-powered photodetectors.

**Keywords:** ZnO microrods; carbon fiber paper; self-powered; photoelectrochemical photodetector

(责任编辑 陈新颖)