

线状 ZnO/Ga₂O₃ 纳米棒阵列光电化学型紫外探测器的性能研究 *

李江¹⁾ 王诗敏¹⁾ 靳梦静¹⁾ 周金元¹⁾ 常鹏¹⁾ 王纲^{2†)} 潘孝军^{1††)}

1) (兰州大学物理科学与技术学院, 兰州 730000)

2) (兰州城市学院电子工程学院, 兰州 730070)

摘要

一维纳米阵列异质结构所具有直接电荷传输通道和内置电场等多种优势,使其成为制造高性能光电器件的理想结构。本研究采用水热法在钛丝基底上制备了 ZnO/ α -Ga₂O₃ 纳米棒阵列 (Nanorod arrays, NRAs) 异质结构,将其作为光电化学 (PEC) 型紫外探测器的光阳极。一方面, ZnO/ α -Ga₂O₃ 异质结产生的内建电场提高了光生载流子的分离效率;另一方面, Ga₂O₃ 对 ZnO NRAs 的包覆不但减少了光阳极的表面态,更重要的是作为阻挡层减少了固液界面处的载流子复合。在 200 $\mu\text{W cm}^{-2}$ 的紫外光照射下, ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 光阳极紫外探测器的光电流密度达到 38.4 $\mu\text{A cm}^{-2}$, 响应度为 0.17 A/W, 是 ZnO NRAs 光阳极的 1.55 倍。此外,这种线状的探测器对 0~360° 范围的紫外光具有良好的线性响应。本研究作为提高 PEC 型紫外探测器光生载流子的分离效率和减少固液界面的复合提供了思路。

关键词: ZnO/ α -Ga₂O₃, 纳米棒阵列, 异质结, 阻挡层, 紫外探测器

PACS: 78.67.-n, 78.30.Fs, 61.46.Km

1 引言

紫外探测技术在诸多领域存在广泛的应用,例如臭氧层监测、导弹跟踪、卫星通信、食品与设备灭菌以及生物化学分析等^[1-4]。光电化学 (PEC) 型紫外探测器具有自供能、制造工艺简单、灵敏度高等优点,在紫外光电探测领域受到越来越多的关注^[5, 6]。然而,传统的平面结构 PEC 型紫外探测器仅能对 180° 范围

***基金:** 甘肃省自然科学基金(25JRRA731)、中央高校基本科研业务费专项资金(561224002)、甘肃省研究生创新之星计划(2025CXZX-041)、甘肃省高校教师创新基金项目(2026B-183)和兰州城市学院博士科研基金项目(LZCU-BS2025-05)资助的课题。

[†]通信作者: E-mail: wangg@lzcw.edu.cn

^{††}通信作者: E-mail: xjpan@lzu.edu.cn

内的入射光进行探测，难以实现 360° 范围内的大角度检测。近年来，研究人员在 PEC 型紫外探测器中引入了线状光电阳极。如 Zhang 等制备了基于 ZnO 纳米线阵列的柔性紫外探测器，实现了的大角度探测^[7]。Zheng 等在钛纤维上构建 $\text{TiO}_2/\text{P3HT}$ 异质结并采用 Au 纳米颗粒修饰，显著提升了紫外探测器的响应度与光谱选择性^[8]。Wang 等使用聚芳基酰胺纤维作为衬底，构筑了基于 ZnO 纳米线的线状柔性光电探测器，实现了 10^4 的高开关比和 360° 全方向探测^[9]。

宽带隙半导体具备高击穿电压、强辐射抗性、高热导率及高电子饱和速率等特性^[10, 11]，是制备紫外探测器的理想材料。常见的第三代宽带隙半导体光阳极材料包括 ZnO ^[12, 13]、 TiO_2 ^[14]、 GaN ^[15]、 Ga_2O_3 ^[16-18]、 SnO_2 ^[19]等。与其它材料相比，ZnO 凭借制备工艺简便、原材料丰富以及环境友好的特性^[20]，在紫外探测器领域得到了广泛应用。六方晶系 ZnO 是一种典型的宽带隙半导体材料，其直接带隙约为 3.37 eV，室温下激子结合能高达 60 meV^[21]。此外，ZnO 是本征 n 型半导体，具有较高的电子迁移率（约为 $200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）^[22]。然而，由于制备过程中存在的固有缺陷（如氧空位、锌间隙原子）等，导致 ZnO 基紫外探测器产生较大的暗电流。研究表明，构建异质结结构可有效提升探测器在响应度和响应速率等方面的性能^[23-25]。例如，Lin 等人报道了一种基于 ZnO/ZnS 核壳结构纳米棒阵列的 PEC 型紫外探测器，其响应时间约为 40 ms，在 340 nm 波长下的响应度超过 56 mA/W ^[26]。Wang 等人制备了一种基于 ZnO/ TiO_2 异质结的 PEC 型紫外探测器，其开关比达到 997，响应和恢复时间分别为 13.5 ms 和 4.0 ms^[27]。Ni 等人制备了三维海胆状 ZnO 阵列，并在其表面沉积非晶态 Ga_2O_3 层，获得了具有 6.93×10^4 超高灵敏度的 PEC 型日盲紫外探测器^[28]。为获取界面质量优异的异质结结构，材料间的晶格匹配至关重要。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 属于特定空间群，其与 ZnO 相似的六方晶格结构使得二者间的晶格失配极小，因此能够形成高质量的异质结构^[29, 30]。同时， $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 是一种本征 n 型直接宽带隙半导体，带隙高达 5.3 eV^[31]。此外， $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 还具有高电子迁移率（ $200 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）、高击穿电压（ $8.5 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ），并具备优异的化学稳定性与抗辐射性^[32, 33]。

为克服 ZnO 光阳极自身结构的不足，本研究采用两步水热法在钛丝基底上制备 ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 异质结构。与 ZnO NRAs 相比较，异质结产生的内建电场将有效促进光生载流子的分离，增强探测器光响应；更重要的是， Ga_2O_3 作为

阻挡层将有效抑制光生电子由半导体向电解液的扩散，减少载流子在界面的复合。

2 实验部分

2.1 材料和器件的制备

1. ZnO NRAs 的制备

水热法制备 ZnO/ α -Ga₂O₃核壳异质结构纳米棒的实验流程如图 1 (a) 所示。首先对基底进行预处理：将钛丝切割为约 20 mm 长度的小段，依次置于丙酮、酒精和去离子水中超声清洗，清洗时长均为 10 min。随后，采用水热法在钛丝表面生长 ZnO NRAs：先将 1.091 g ZnCl₂溶解于 40 mL 去离子水中，持续搅拌 30 分钟；接着缓慢滴加氨水并不断搅拌调节溶液 pH 值至 10；持续搅拌 30 min 后，将溶液转移至玻璃瓶内，再将预处理后的钛丝完全浸没于反应溶液中，随后将玻璃瓶置于 92°C 环境下保温 4 h、6 h、8 h、10 h；最后取出钛丝，用去离子水和酒精清洗，并在 500°C 下退火 2 h，即可制得 ZnO NRAs。

2. ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 的制备

采用水热法在 ZnO NRAs 表面包裹一层 Ga₂O₃薄膜。具体步骤如下：首先，将 1.535 g 的 Ga(NO₃)₃·xH₂O 加入 30 mL 去离子水中，通过磁力搅拌使其完全溶解；接着，向上述溶液中加入 0.954 g 碳酸钠 (Na₂CO₃)，持续搅拌约 30 min，制得反应液；随后，将优选出的 ZnO NRAs 浸入反应液中，一同转移至水热釜内，在 90 °C 下保温特定时长；最后，取出样品后依次用去离子水和无水乙醇洗涤，再于 400 °C 下退火 2 h，得到 α -Ga₂O₃ 包覆的 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 核壳结构。水热时间分为 0 h、8 h、16 h、24 h 的样品分别标记为 G-0、G-8、G-16、G-24。

2.2 样品表征与器件性能测试

样品的微观结构通过扫描电子显微镜 (SEM, Apreo S, FEI) 和透射电子显微镜 (TEM, Tecnai F30, FEI) 进行观察。结构组成分析采用 X 射线衍射仪 (XRD, X'pert-Pro, Philips, Cu K α 线)、拉曼光谱仪 (Raman, LabRAM HR Evolution, 532 nm) 及 X 射线光电子能谱仪 (XPS, Kratos AXIS Ultra DLD, Kratos, Al K α) 完成。吸收光谱使用紫外-可见分光光度计 (UV-Vis, Lambda 950, PerkinElmer) 进行测试。

如图 1 (b) 所示, 本文采用电化学工作站 (RST5200, 郑州世瑞思仪器科技有限公司) 对线状 PEC 型紫外光电探测器的光电性能进行测试。将基于钛丝的 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 作为光阳极, 有效光接收面积为 0.03 cm^2 ; 对电极为面积 2 cm^2 的铂片; 电解液为 0.5 M 的 Na_2SO_4 溶液。测试条件为零偏压、 365 nm 紫外光辐射 (光功率密度: $P_{\text{inc}} = 200\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$)。

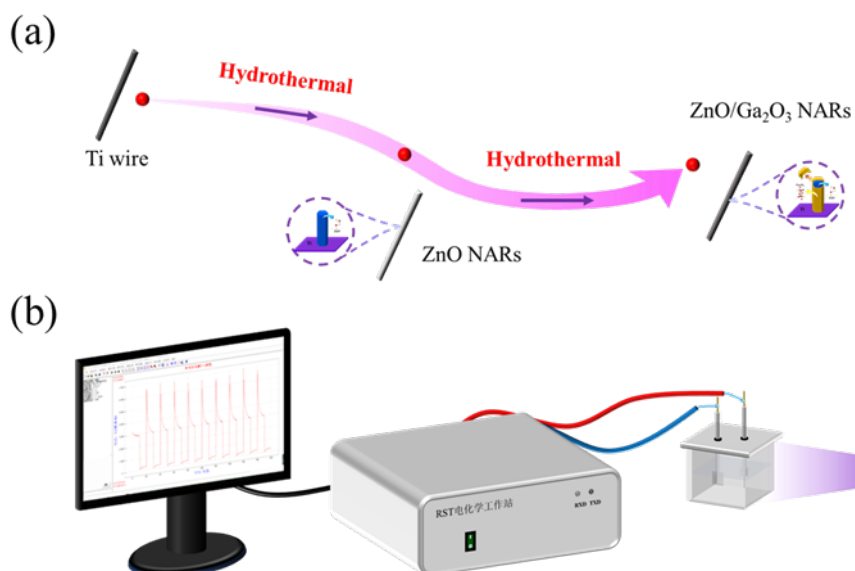


图 1 (a) $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 的制备流程示意图; (b) PEC 型紫外探测器光电性能测试装置。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the preparation of $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs; (b) Photoelectric property testing device for PEC ultraviolet detectors.

3 结果分析

图 2 为不同沉积时间下制备的 ZnO NRAs 的表面形貌。可以看到, 不同沉积时间下的 ZnO 纳米棒大部分都呈现正六棱柱状, 其边长在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右。另外, 随着沉积时间的增长, ZnO 纳米棒从不完整的棱柱 (边缘呈现阶梯状) 逐渐变为完整的棱柱, 此时沉积时间在 6 h 左右。随着沉积时间进一步加长, ZnO 六棱柱上端边缘又被溶解, 这是由于 ZnO 在反应液中结晶与溶解化学反应的动态平衡所导致的。此外, 从右上角的低倍 SEM 照片可以看到 ZnO NRAs 在 Ti 丝上分布非常均匀且很密集, 这对光阳极大面积的光吸收和与电解液充分地接触十分有利。

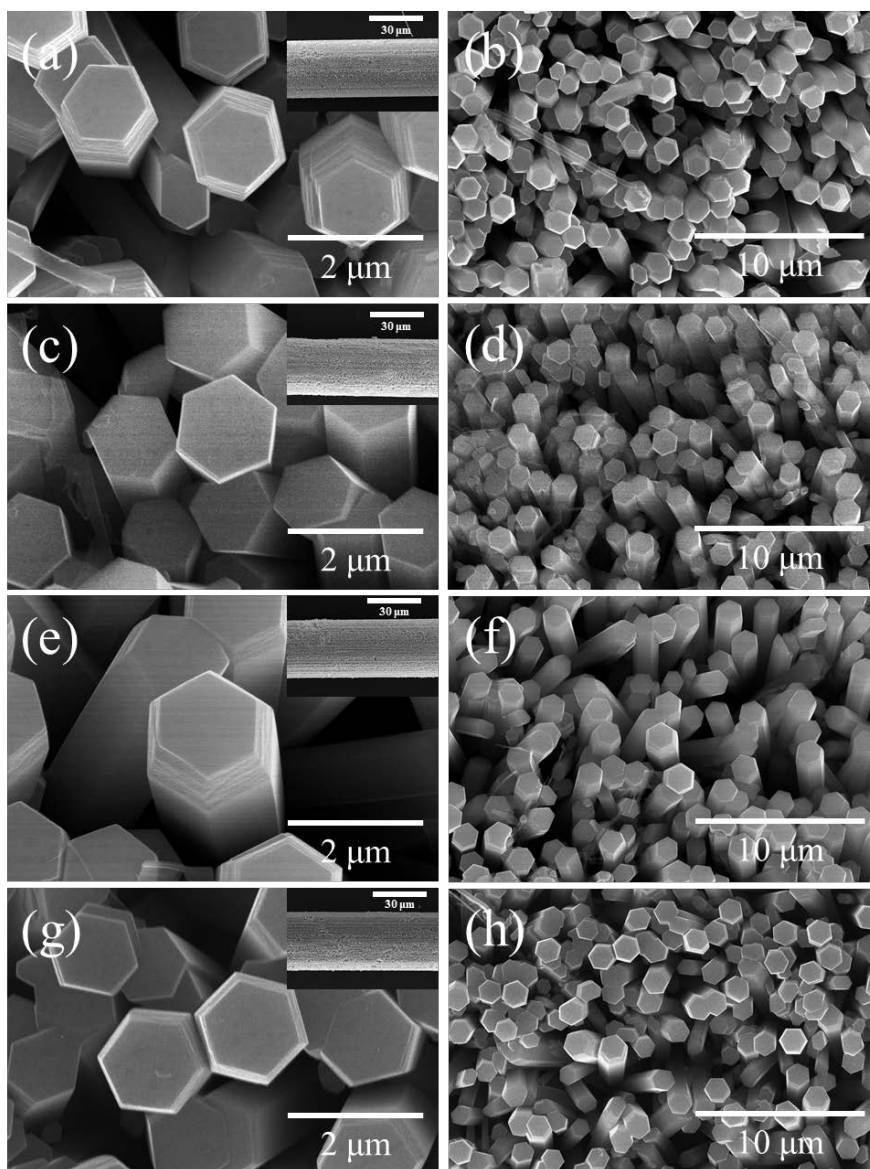


图 2 不同沉积时间的 ZnO NRAs 的 SEM 照片，插图为对应的低倍率 SEM 照片 (a、b) 4 h、
(c、d) 6 h、(e、f) 8 h、(g、h) 10 h.

Fig. 2 SEM images of ZnO NRAs at different deposition times; the insets correspond
low-magnification SEM images (a, b) 4 h, (c, d) 6 h, (e, f) 8 h, and (g, h) 10 h.

图 3 显示了不同沉积时间下制备的 ZnO NRAs 的横截面 SEM 照片，垂直生长于 Ti 丝基底表面的一维 ZnO 纳米棒为电荷的运输提供了直接通道，有利于提升载流子传输与收集效率。可以看到，ZnO 纳米棒长度随沉积时间的增长先变长后变短，在沉积时间为 6 h 时达到最大长度。

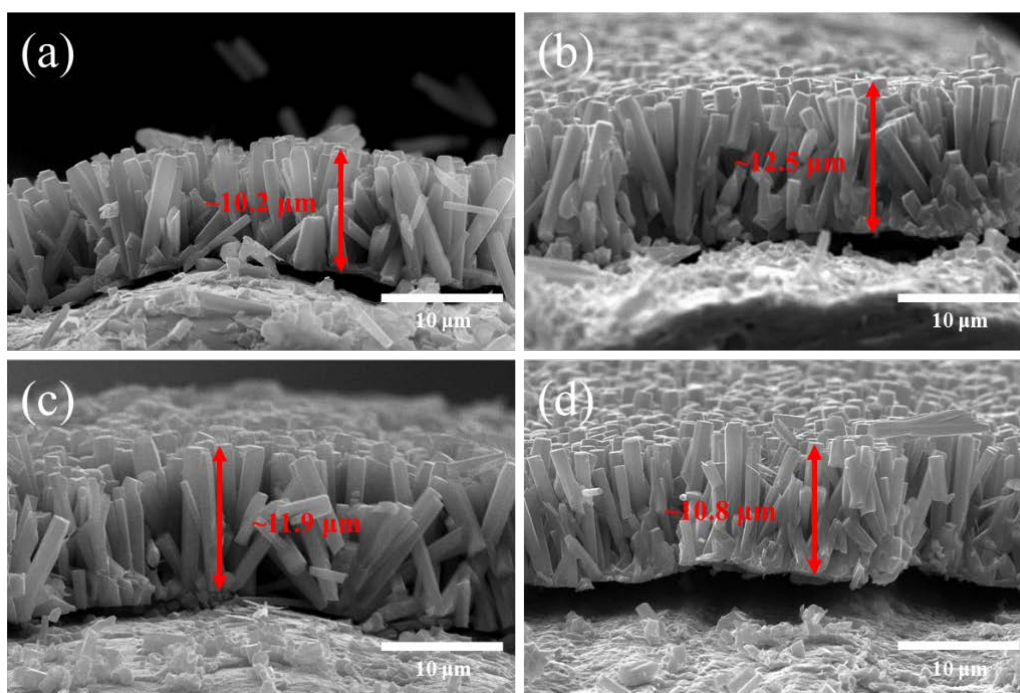


图 3 不同沉积时间的 ZnO NRAs 截面 SEM 照片 (a) 4 h、(b) 6 h、(c) 8 h、(d) 10 h.

Fig. 3 The cross-sections SEM images of ZnO NRAs at different deposition times: (a) 4 h, (b) 6 h, (c) 8 h, and (d) 10 h.

根据 ZnO NRAs 的生长情况，本文选取沉积时间为 6 h 的样品，在其表面继续生长 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 。图 4 呈现了不同水热时间条件下制备的 ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 的表面微观形貌。其中，图 4 (a) 和 (b) 为沉积时间为 6 h 的 ZnO NRAs 的 SEM 照片。图 4 (c-h) 为 ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 的 SEM 照片，纳米棒依然保持六棱柱形态，但其尺寸相较于 ZnO NRAs 稍大。不同水热时间下 ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 的 SEM 照片如下：(a、b) 0 h，(c、d) 8 h，(e、f) 16 h，(g、h) 24 h。包覆 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 后样品表面不再光滑，存在一定的波纹状纹理。在水热时间较短的情况下， $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 壳层分布不均匀，产生了一些板状延伸结构；然而，随着水热时间的增加，表面变得比较光滑，这可能是 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 晶体发生溶解-再结晶过程的结果。

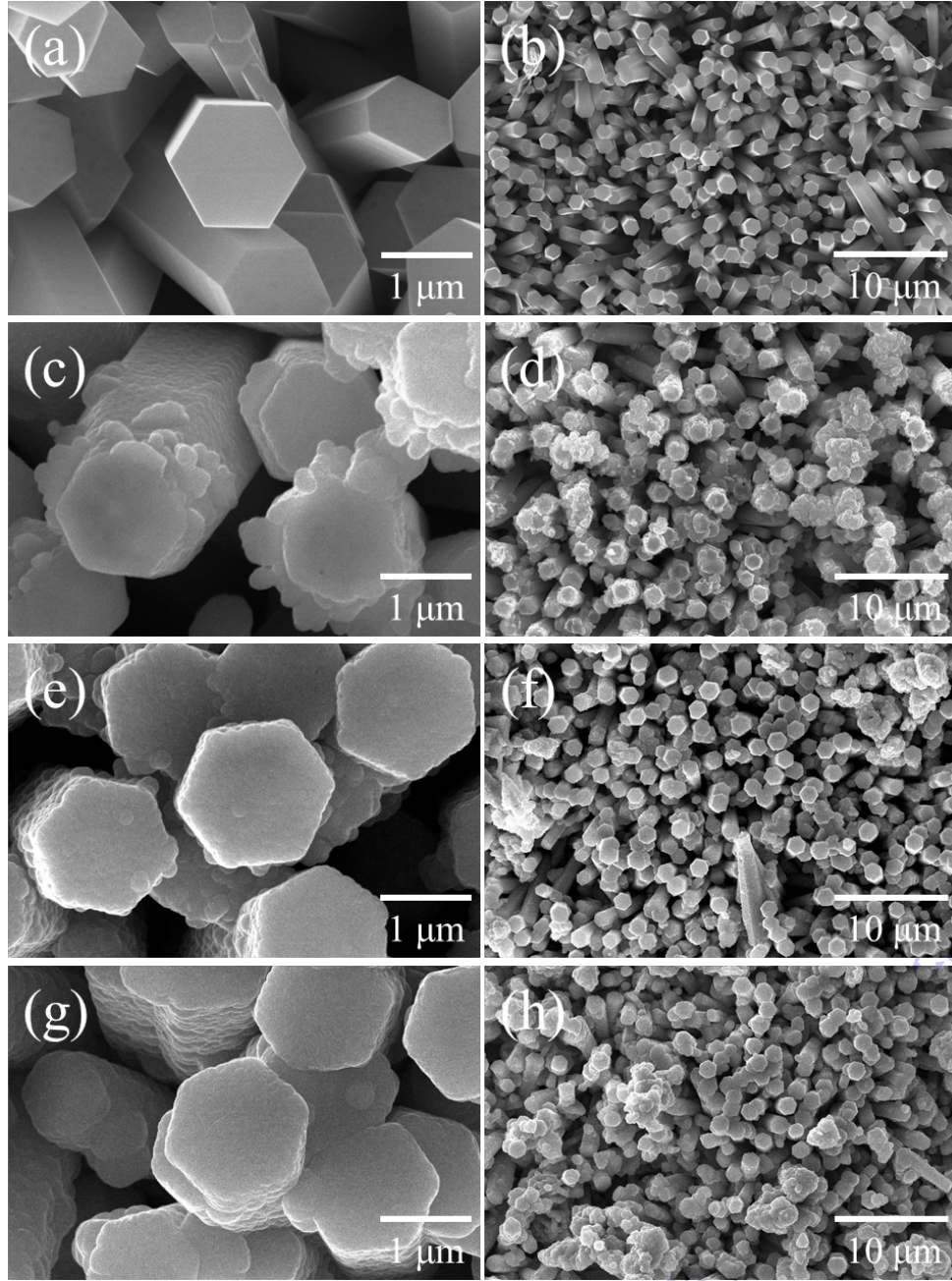


图4 不同水热时间 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 表面 SEM 照片: (a、b) 0 h; (c、d) 8 h; (e、f) 16 h; (g、h) 24 h.

Fig. 4 SEM images of the ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs with different hydrothermal times (a, b) 0 h; (c, d) 8 h; (e, f) 16 h; (g, h) 24 h.

图5 (a) 为单根 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 的 TEM 照片。图5 (b) 为同一样品的 HR-TEM 照片, 在黄色虚线处可清晰观察到 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 异质界面。图中左上角晶体的晶面间距约为 1.583 Å, 与六方 ZnO 的 (110) 晶面相符; 右下角晶体的晶面间距约为 2.479 Å, 与 α -Ga₂O₃ 的 (110) 晶面相契合。图5 (c) 和

(d) 分别呈现了 HR-TEM 照片中蓝色和红色虚线框内晶格的傅里叶变换 (FFT) 图谱。两者的衍射图谱存在明显差异, 其清晰的晶格点和电子衍射图谱表明 ZnO 和 α -Ga₂O₃ 均具备优异的结晶性。图 5 (e-h) 展示了 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 的元素分布状况, 其中 O 元素在纳米棒内呈现相对均匀的分布态势, Zn 元素主要聚集于纳米棒内部, 而 Ga 元素主要分布在纳米棒外部, 这证实了 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 核壳异质结构的形成。

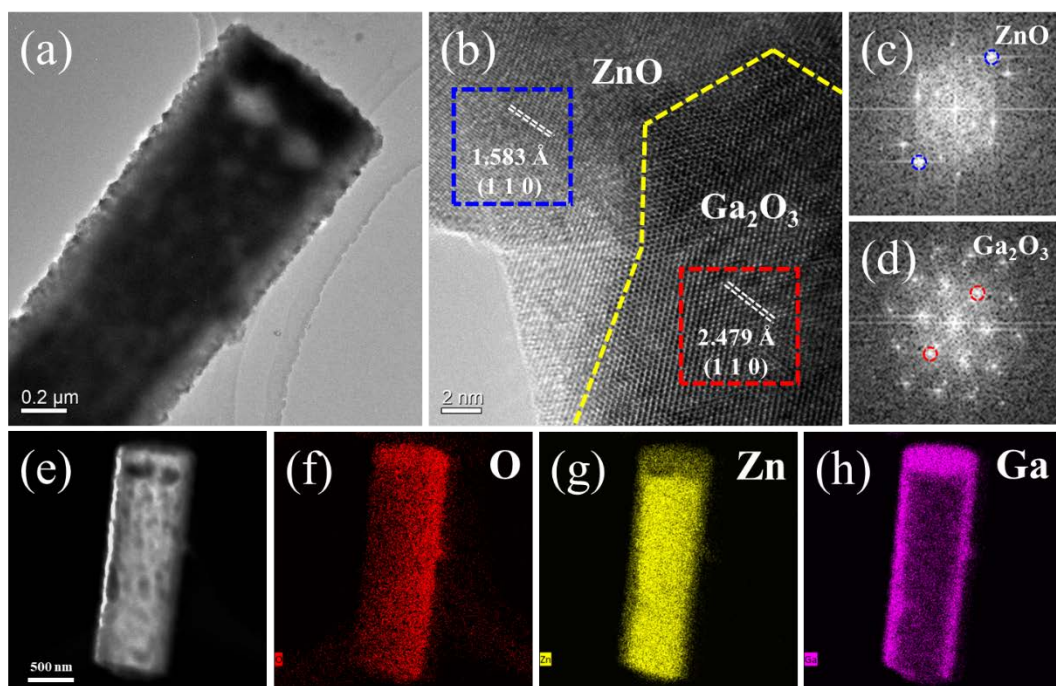


图 5 ZnO/ α -Ga₂O₃ 核壳结构 TEM 照片: (a) TEM 照片, (b) HR-TEM 照片; (c) 蓝色虚线框内晶格 FFT 照片, (d) 红色虚线框内晶格 FFT 照片; (e-h) TEM-EDS 元素分布图。

Fig. 5 TEM results of the ZnO/ α -Ga₂O₃ core-shell structure (a) TEM image, (b) HR-TEM image; FFT patterns of the lattice in the (c) Blue and (d) Red dashed boxes; (e-h) TEM-EDS elemental mapping images.

样品的组成成分通过 XRD 进行分析。图 6 (a) 呈现了 ZnO NRAs、Ga₂O₃、以及不同水热时间 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 复合材料的 XRD 谱图。谱图中 2θ 为 31.73°、34.43°、36.21°、47.64°、56.61°、62.92°、68.14°、72.53° (改为两位小数, 下同) 处的衍射峰分别对应六方相 ZnO (100)、(002)、(101)、(102)、(110)、(103)、(112)、(004) 晶面 (PDF#36-1451)。而 2θ 为 38.44°、40.21°、70.73° 和 76.23° 的衍射峰分别对应六方 α -Ti 晶系的 (002)、(101)、(103) 和 (112) 晶面 (PDF#44-1294)。此外, ZnO 沿 (002) 晶面择优生长与

其沿 c 轴优先生长的特性高度一致^[34, 35]。 Ga_2O_3 的 XRD 谱则与 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (PDF#06-0503) 相契合, 2θ 为 24.4° 、 33.8° 、 36.0° 、 41.4° 、 50.2° 、 55.1° 、 63.3° 、 64.7° 处的衍射峰分别对应其 (012)、(104)、(110)、(113)、(024)、(116)、(214)、(300) 晶面。 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 复合材料的 XRD 谱包含了六方 ZnO 、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 以及基底 $\alpha\text{-Ti}$ 的衍射峰, 且不存在其他杂峰, 这表明样品具备较高的纯度。此外, 从 XRD 谱图中可以发现 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 沿 (110) 晶面择优生长, 且衍射峰信号随着水热时间的增加逐渐增强, 这意味着样品中 Ga_2O_3 的含量在逐步增加。图 6 (b) 为 ZnO 、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 及 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 在室温条件下的 Raman 光谱。 ZnO 在 330 cm^{-1} 处的跃迁归因于多声子散射过程, 与 Zn-O 振动存在关联, 而 436 cm^{-1} 处的 Raman 峰则与 O 原子相关^[42]。由 Raman 光谱可以看出, 随着水热时间的延长, $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中 ZnO 的 $\text{E}_{2\text{H}}$ 峰 Raman 位移相较于纯 ZnO 逐渐增大, 这表明电子从 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 向 ZnO 发生转移, 进而证实了 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质结的存在。

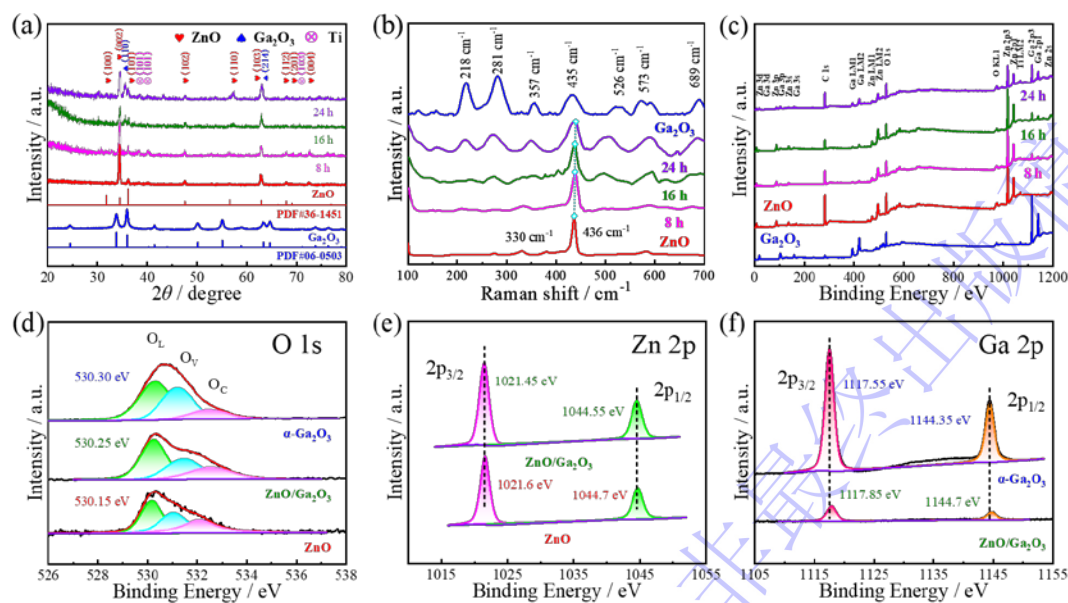


图 6 ZnO 、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 及 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的 XRD 谱图 (a), Raman 光谱 (b), XPS 全谱 (c); 高分辨率 XPS 谱 O 1s (d)、Zn 2p (e)、Ga (f)。

Fig. 6 (a) XRD, (b) Raman, (c) XPS full survey, and elemental high-resolution XPS profiles (d) O 1s, (e) Zn 2p, (f) Ga of the ZnO , $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ and $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

ZnO 、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 以及 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的表面成分通过 XPS 进行分析, 如图 6 (c-f) 所示。所有 XPS 谱均以 C 1s 峰为基准进行校准。图 6 (c) 呈现了 ZnO 、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$

及 ZnO/ α -Ga₂O₃ 的完整 XPS 谱, 结果显示样品仅含 C、O、Zn、Ga 和 Ti 元素, 无任何杂质元素。此外可观察到, 随着水热时间的延长, Ga 2p 峰的信号强度逐渐增强, 表明样品表面 Ga₂O₃ 的含量相应增加。图 6 (d-f) 展示了 ZnO、 α -Ga₂O₃ 及 ZnO/ α -Ga₂O₃ 所含元素的高分辨率 XPS 谱图。如图 6 (d) 所示, O 1s 峰可分解为 O_L、O_V 和 O_C 三个峰。其中, O_L 组分对应与 Zn²⁺ 键合的晶格氧, O_V 为缺陷氧; O_C 为吸附氧^[43]。如图 6 (e) 和 (f) 所示, ZnO/ α -Ga₂O₃ 的 Zn 2p 峰相较于 ZnO 向较低结合能方向偏移, 而 ZnO/ α -Ga₂O₃ 的 Ga 2p 峰则相较于 α -Ga₂O₃ 向较高结合能方向偏移。这是由于 ZnO 与 α -Ga₂O₃ 结合形成异质结时, 二者费米能级的差异导致电子从 α -Ga₂O₃ 向 ZnO 转移^[44]。

图 7 (a) 为室温下 ZnO NRAs 的 Raman 光谱。跃迁发生在 100、204、332、384、438、544、582、662 和 856 cm⁻¹ 附近的位移处, 其中 100、384、436 和 582 cm⁻¹ 处的峰分别对应六方 ZnO 的 E_{2L}、A₁(TO)、E_{2H} 和 A₁(LO) 基频声子模式。204 cm⁻¹ 附近的峰属于二阶声子模式 (2E_{2L}), 其余四个位于 332、544、662 和 856 cm⁻¹ 附近的 Raman 峰分别归属于 3E_{2H}-E_{2L}、E₁(TO)+E_{2L}、2(E_{2H}-E_{2L}) 和 A₁(TO)+E_{2L} 的多声子散射模式^[36-38]。图 7 (b) 为室温下 α -Ga₂O₃ 的 Raman 光谱。 α -Ga₂O₃ 的 Raman 振动峰出现在约 218(A_{1g,1})、256(E_{g,1})、281(E_{g,2})、357(E_{g,3})、435(E_{g,4})、573(A_{1g,2})、689 cm⁻¹(E_{g,5}) 处^[39]。689 cm⁻¹ 处的高频峰对应 GaO₄ 的对称伸缩振动, 而 300 至 600 cm⁻¹ 范围内的 Raman 峰则对应 GaO₆ 八面体的对称伸缩振动 (526 cm⁻¹ 处的 Raman 峰归属于 GaOOH)^[40]。200 cm⁻¹ 至 300 cm⁻¹ 范围内的低频峰对应 GaO₆ 八面体的扭转与弯曲振动模式^[41]。

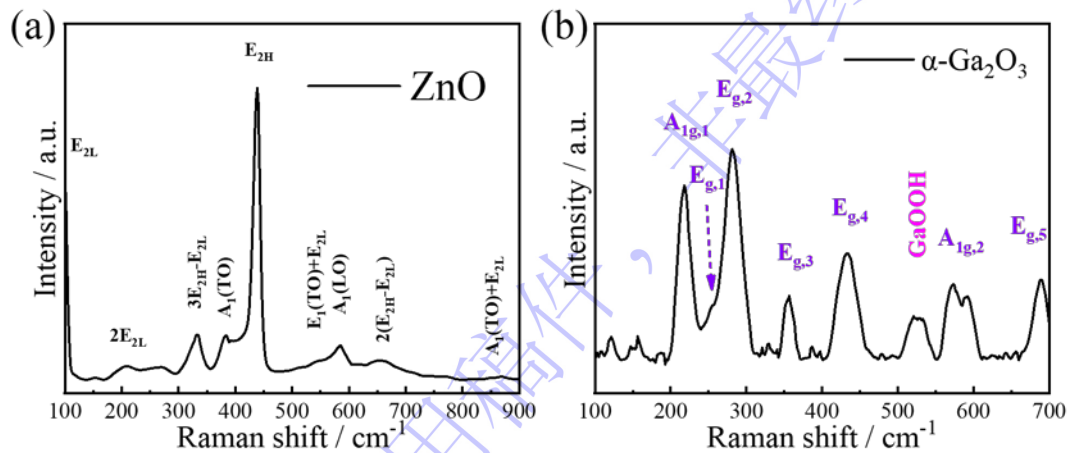


图 7 (a) ZnO 和 (b) α -Ga₂O₃ 的 Raman 光谱。

Fig. 7 Raman spectra of the (a) ZnO and (b) α -Ga₂O₃.

图 8 (a) 为基于 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 光阳极 PEC 型紫外探测器的开路电压衰减 (OCVD, Open-Circuit Voltage Decay) 曲线。插图为根据 OCVD 曲线计算得到的电子寿命曲线, 计算公式如下^[45]:

$$\tau_n = -\frac{k_B T}{e} \left(\frac{dV_{oc}}{dt} \right)^{-1} \quad (1)$$

其中 $k_B T$ 为热能, e 为单位电荷电量, V_{oc} 为开路电压。电子寿命通常反映载流子的复合速率, 寿命越长意味着电子-空穴对复合越慢。在 ZnO NRAs 表面包覆 α -Ga₂O₃ 后器件的电子寿命延长, 表明其电荷复合速率最慢, 这是由于 ZnO/ α -Ga₂O₃ 异质结产生的内建电场提升了电子-空穴对的分离效率。此外, 本文通过电化学阻抗谱 (EIS) 探究了紫外光照射下光阳极与电解质界面的电荷转移特性。图 8 (b) 为 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 光阳极 PEC 型紫外探测器的 EIS-Nyquist 曲线, 插图为其等效电路, 拟合得到光阳极与电解质界面的电荷转移电阻 (R_{ct}) 如表 1 所示。结果显示, ZnO NRAs 与电解质界面的 R_{ct} 比较小, 但 α -Ga₂O₃ 阻挡层的形成有助于抑制光生载流子向电解质的扩散。

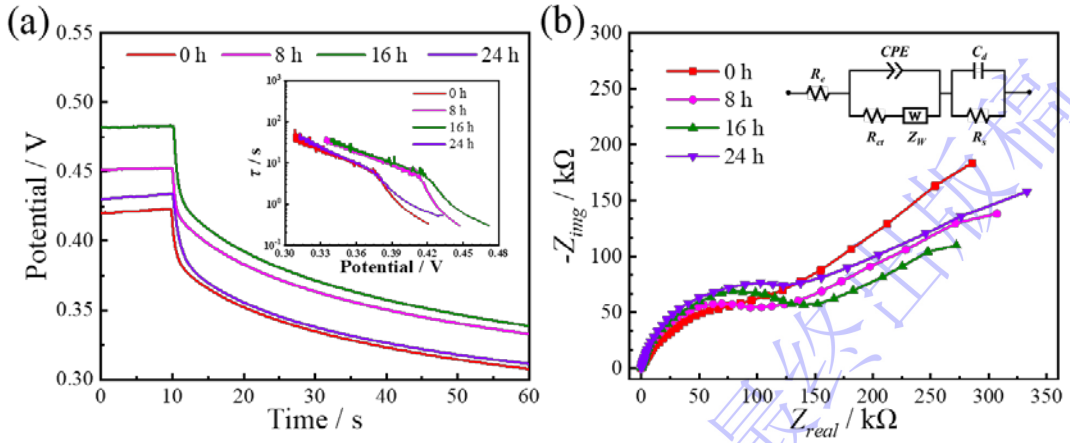


图 8 (a) ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 紫外探测器的 OCVD 曲线, 插图为电子寿命曲线; (b)

ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 紫外探测器的 EIS-Nyquist 曲线, 插图为等效电路图

Fig. 8 (a) OCVD curves with its electronic lifetime curves in the inset and (b) EIS-Nyquist diagram of the UV photodetectors based on ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs.

图 9 (a) 为 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 光阳极 PEC 型紫外探测器的光响应曲线。在周期性紫外光开关信号下光电流表现良好的稳定性与重复性。可以看出, ZnO NRAs 光阳极在经 α -Ga₂O₃ 包覆后, 光电流出现了比较明显的增大, 说明 α -Ga₂O₃

阻挡层有效的抑制了载流子的界面的复合。响应度 (R) 和探测率 (D^*) 是表征紫外光电探测器性能的两个关键参数, 其计算公式如下^[46]:

$$R = \frac{J_p - J_d}{P_{inc}} \quad (2)$$

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{2eJ_d}} \quad (3)$$

其中 J_{sc} 为光电流密度, J_d 为暗电流密度, P_{inc} 为入射光功率密度, e 为单位电荷电量。水热时间为 0 h、8 h、16 h、24 h 样品的 J_{sc} 和 J_d 值, 如表 1 所示。如图 9 (b) 所示, 随着水热时间的增加, J_{sc} 呈现出先增大后减小的趋势, 在水热时间为 16 h 时达到最大值 $38.4 \mu\text{A cm}^{-2}$, 此时 J_d 约为 $5.1 \mu\text{A cm}^{-2}$, 得出其 R 值为 0.17 A/W 。相比之下, 基于 ZnO NRAs 光阳极 PEC 型紫外探测器的 J_{sc} 约为 $27.4 \mu\text{A cm}^{-2}$, J_d 约为 $4.5 \mu\text{A cm}^{-2}$, R 值为 0.11 A/W 。因此, ZnO NRAs 经 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 包覆后 R 增大约 1.52 倍, 增幅约为 52%。 D^* 是综合评估 R 和 J_d 的参数。计算结果显示, 水热时间为 16 h 的 ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 光阳极紫外探测器的 D^* 为 $5.3 \times 10^{11} \text{ Jones}$, 同样优于 ZnO NRAs 光阳极紫外探测器 ($1.2 \times 10^{10} \text{ Jones}$)。这一性能提升可归因于 ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质结形成的内建电场, 该电场能有效促进了光生电子-空穴对的分离。另一方面, 水热时间为 24 h 样品较 16 h 样品的 J_{sc} 有所下降, 这是因为 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 层的增厚会阻碍 ZnO 对 365 nm 紫外光的吸收, 进而抑制光生电子-空穴对的产生。

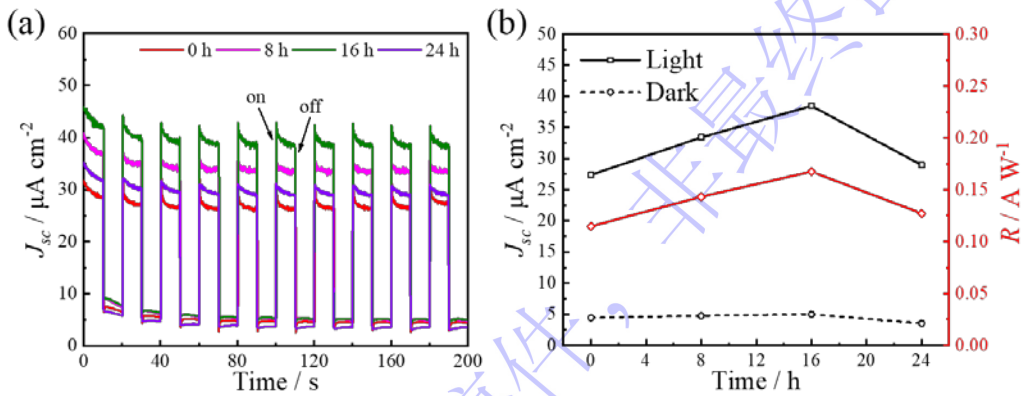


图 9 (a) ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 紫外探测器在明/暗条件下的光电流响应; (b) ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 紫外探测器的响应度.

Fig. 9 (a) Photocurrent response of ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs photodetectors under periodic light/darkness. (b) Responsivity (R) of the ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs photodetectors.

响应时间是紫外光电探测器性能的另一重要指标，反映了探测器的响应速度。图 10 为光响应曲线中紫外光开/关时上升沿与下降沿的放大图。其中，上升时间 (τ_r) 定义为光电流增大到稳定光电流的 63% ($1-1/e$) 所需的时间，恢复时间 (τ_d) 定义为稳定光电流降至 37% ($1/e$) 所需的时间。探测器的响应时间见表 1。ZnO NRAs 经 α -Ga₂O₃ 包覆后，探测器 τ_r 减小的趋势不很明显，这是因为虽然异质结处的内建电场有利于促进光生载流子的分离，但界面处形成的势垒一定程度上也阻碍了对空穴向电解液的扩散。相比而言，ZnO/ α -Ga₂O₃ 异质结构探测器 τ_d 普遍减小，这归因于 α -Ga₂O₃ 的包覆减少了 ZnO NRAs 的表面态。

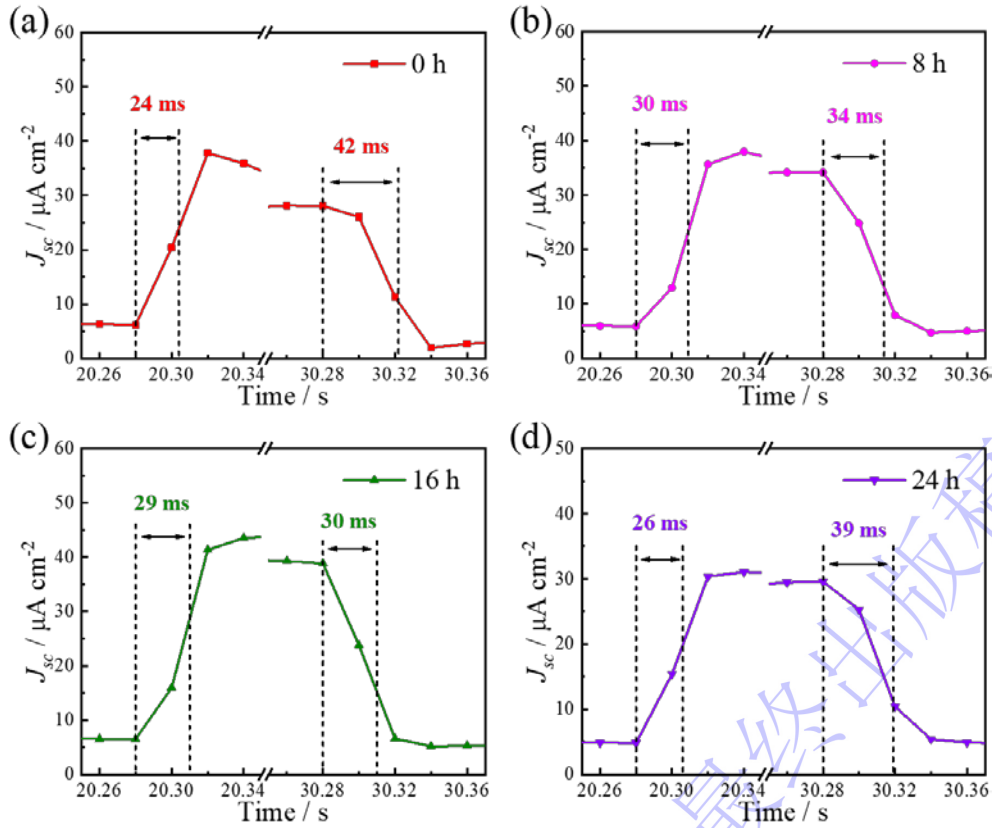


图 10 (a) ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 紫外探测器的响应时间: (a) 0 h, (b) 8 h, (c) 16 h, (d) 24 h.

Fig. 10 Response times of the ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs photodetectors (a) 0 h, (b) 8 h, (c) 16 h, (d) 24 h.

表 1 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 光阳极界面电荷转移电阻 (R_{ct}) 及探测器的响应性能

Table 1 The charge transfer resistance (R_{ct}) at the photoanode interface and the response performances of the detectors

Samples	G-0	G-8	G-16	G-24
$R_{ct}(\Omega)$	9.070×10^3	1.084×10^4	1.348×10^4	1.087×10^5
$J_{sc}(\mu A cm^{-2})$	27.4	33.5	38.4	28.6

J_d ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	4.5	4.8	5.1	4.3
R (A/W)	0.11	0.14	0.17	0.12
D^* (Jones)	1.2×10^{11}	1.4×10^{11}	5.3×10^{11}	4.1×10^{11}
τ_r (ms)	24	30	29	26
τ_d (ms)	42	34	30	39

线性响应是高性能紫外探测器的重要特性。图 11 (a) 为基于 G-16 的紫外探测器的光电流密度 (J_{sc}) 与入射光功率密度 (P_{inc}) 的散点图；图 10 (b) 和 (c) 分别呈现了 (a) 图中红色与蓝色虚线框区域的放大视图及其对应的线性拟合曲线。可以看出，探测器在 $0-0.2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $0.2-1.0 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的弱紫外光功率密度范围内均表现出良好的线性响应特性。另外，对于线状 PEC 型紫外探测器而言，其独特的光阳极结构使其具备多角度检测能力。图 11 (d) 为探测器多角度测试示意图，图 11 (e) 为不同入射角 (θ_i) 下的光响应曲线；图 11 (f) 则呈现了 J_{sc} 随 θ_i 变化的雷达图。结果表明，基于 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 的线状 PEC 型紫外探测器在 $0-360^\circ$ 入射角范围内对紫外光均具有良好响应，且 J_{sc} 波动幅度很小。这一特性可归因于 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 在钛丝表面的均匀分布，以及 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 在 ZnO NRAs 表面的均匀生长。同时，本研究还列出了一些近年报道的 ZnO 基自供能紫外探测器的性能数据见表 2。对比这些结果发现，本研究工作制备的器件在响应速度、响应度及探测率等方面都具有一定的优势。

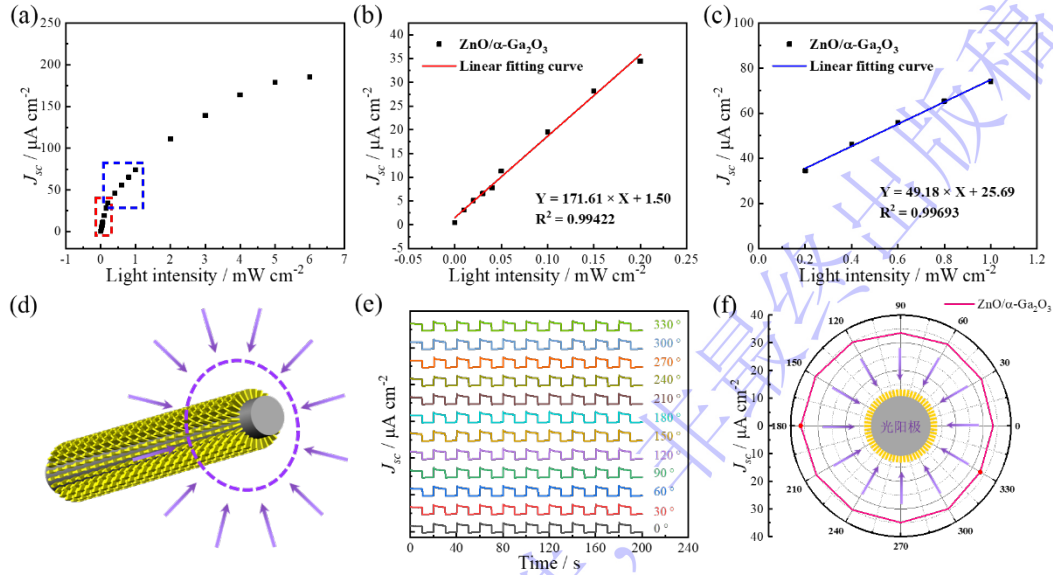


图 11 (a) J_{sc} - P_{inc} 散点图；(b)和(c)为(a)中红色虚线框与蓝色虚线框放大视图及其线性拟合曲线；(d)线状 PEC 型紫外探测器的多角度探测示意图；(e) 探测器在不同 θ_i 下的光响应曲线；(f)探测器的 J_{sc} - θ_i 雷达图。

Fig. 11 (a) J_{sc} - P_{inc} scatter plots; (b) Red and (c) Blue dashed box enlarged view and its linear fitting curve; (d) Schematic diagram of the multi-angle measurements; (e) Response curves for

UV light of different θ_i and (f) J_p - θ_i radargram of the UV photodetectors.

表 2 ZnO 基自供能紫外探测器的性能比较

Table 2: Performances comparison of ZnO-based self-powered ultraviolet detectors

Devices	λ (nm)	τ_r / τ_d (ms)	R (mA/W)	D^* (Jones)	Type	Refs.
ZnO/GaN	360	/	350	3.5×10^{11}	solid	[56]
ZnO/PLZT	360	40/50	3.96	6.6×10^{10}	solid	[57]
ZnO/ ϵ -Ga ₂ O ₃	254	523.1/31.7	4.12	2.24×10^{12}	solid	[58]
ZnO/V _o -Ga ₂ O ₃	266	150/1100	7.975	/	solid	[28]
ZnO/Ga ₂ O ₃	251	0.1/0.9	9.7	6.29×10^{12}	solid	[30]
ZnO/CFP	365	76.51/48.51	31.76	/	PEC	[59]
ZnO/ZnS	340	40	56	/	PEC	[26]
ZnO/TiO ₂	365	13.5/40	/	/	PEC	[27]
ZnO NRAs	365	24 /42	110	1.2×10^{11}	PEC	This work
ZnO/ α -Ga ₂ O ₃	365	29/30	170	5.3×10^{11}	PEC	

图 12 (a) 为紫外光辐照下的 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 结构示意图。一方面，这种阵列结构为载流子提供了输运通道，有助于提升载流子的传输与收集效率；另一方面，阵列结构可使入射光在其内部发生多角度散射，有利于提高光吸收效率^[47-49]。通常，在 PEC 型紫外探测器中，n 型半导体与电解质接触时引发半导体能带弯曲，界面势垒有利于阻止光生载流子光电子向电解液扩散^[50]，如图 12 (b) 所示。ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 基 PEC 型紫外探测器能量带结构及器件工作原理示意图如图 12 (c) 和 (d) 所示。

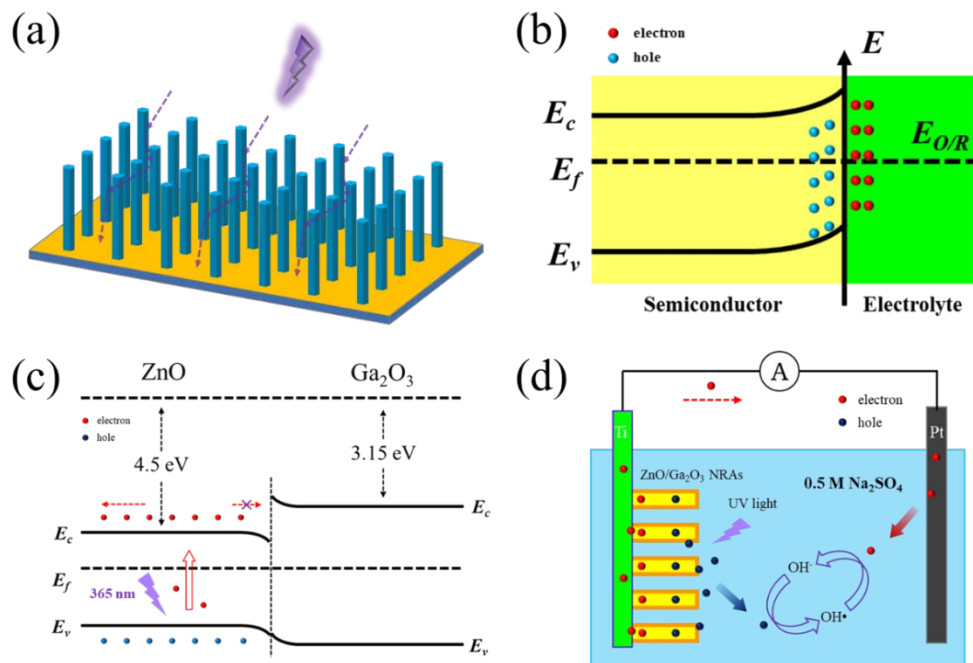


图 12 (a) 紫外光辐照下的 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 结构示意图; (b) 光阳极/电解质界面能带示意图; (c) ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 异质结能带示意图; (d) 基于 ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs 的 PEC 型紫外探测器工作机理图。

Fig. 12 (a) Schematic structure of the ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs under UV radiation; (b) Schematic energy bands at the photoanode/electrolyte interface; (c) Schematic energy bands of the ZnO/ α -Ga₂O₃ heterojunction; and (d) Schematic working mechanism of the PEC-type UV photodetectors based on ZnO/ α -Ga₂O₃ NRAs.

通过紫外-可见吸收光谱（图 13）计算可知，ZnO 和 α -Ga₂O₃ 的光学带隙分别为 3.16 eV 和 4.70 eV^[51]；二者的电子亲和能参考值则分别为 4.5 eV 和 3.15 eV^[52]。根据安德森电子亲和能规则，ZnO/ α -Ga₂O₃ 异质结的导带偏移量 (ΔE_c) 约为 1.35 eV，价带偏移量 (ΔE_v) 较小，约为 0.19 eV。ZnO 与 α -Ga₂O₃ 均为本征 n 型半导体，工作过程中主要通过电子传导，因此 ZnO/ α -Ga₂O₃ 纳米棒基 PEC 型紫外探测器的性能优于 ZnO 纳米棒基同类器件^[53]。其工作机制如下：当 365 nm 紫外光照射光阳极时，ZnO 吸收光子能量产生光生电子-空穴对；光电子经 ZnO 导带扩散至基底，再通过外部电路和铂电极迁移至电解质。由于 ZnO 和 α -Ga₂O₃ 之间较大的导带差 ΔE_c ，来自于 ZnO 的光生电子很难越过 α -Ga₂O₃ 势垒而进入电解质。因此， α -Ga₂O₃ 作为阻挡层抑制了光生电子和 OH⁻ 的复合，增大了光电流。与此同时，由于 ZnO 和 α -Ga₂O₃ 之间价带差较小，光生空穴可以通过隧穿的方式

越过势垒到达半导体/电解液界面处，并从 Na_2SO_4 溶液中捕获 OH^- ($\text{h}^+ + \text{OH}^- = \text{OH}^\cdot$) [54]。最后， $\text{OH}^\cdot$ 在 Pt 对电极上被还原为 OH^- ($\text{e}^- + \text{OH}^\cdot = \text{OH}^-$) [52]。

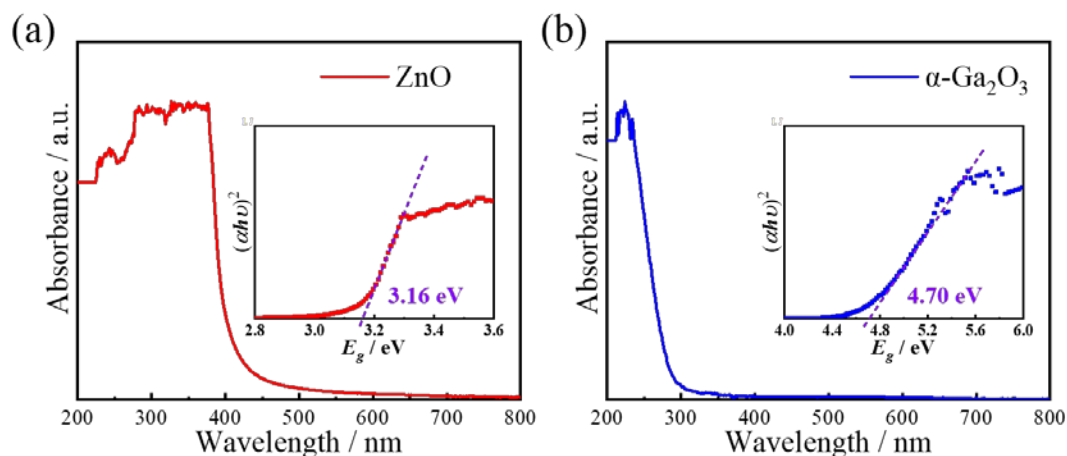


图 13 ZnO(a)和 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (b)的 UV-Vis 吸收光谱.

Fig. 13 UV-Vis absorption spectra of the (a) ZnO and (b) $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

4 结 论

本研究采用水热法在 ZnO NRAs 外生长了一层高结晶质量的 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜，形成了 ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 核壳异质结构。研究发现，ZnO/ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs 复合结构将探测器的光电流密度提高到了 $38.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，光响应度增大为 ZnO NRAs 光阳极紫外探测器的 1.52 倍。值得注意的是， $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的包覆减少了 ZnO NRAs 的表面态，使得探测器的恢复时间 τ_d 变短。同时，探测器 $0\sim 1.0 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 范围内弱光表现出良好的线性响应，并实现了 360° 范围内的大角度探测。

参考文献

- [1] Huang L J, Hu Z R, Zhang H, Xiong Y Q, Fan S Q, Kong C Y, Li W J, Ye L J, Li H L 2021 *J. Mater. Chem. C* **9** 10354
- [2] Zhang D Y, Ge C W, Wang J Z, Zhang T F, Wu Y C, Liang F X 2016 *Appl. Surf. Sci.* **387** 1162
- [3] Ding M, Zhao D X, Yao B, Li Z P, Xu X J 2015 *RSC Adv.* **5** 908
- [4] Wang J J, Fu C, Cheng H Y, Tong X W, Zhang Z X, Wu D, Chen L M, Liang F X, Luo L B 2021 *ACS Nano* **15** 16729
- [5] Wei K, Li B Q, Gong C S, Zhu Z R, Zhang Y, Liu M H, Ren P L, Pan X J, Wang Y Q, Zhou J Y 2021 *Nanotechnology* **32** 475503
- [6] Huang G Z, Zhang P P, Bai Z M 2019 *J. Alloys Compd.* **776** 346
- [7] Zhang X M, Ji F B, Wang G, Li J, Jin M J, Zhou J Y, Xie E Q, Pan X J 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 031105
- [8] Zheng L X, Deng X L, Wang Y Z, Chen J X, Fang X S, Wang L, Shi X W, Zheng H J

- 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2001604
- [9] Wang S L, Zou Y S, Shan Q S, Xue J, Dong Y H, Gu Y, Song J Z 2018 *RSC Adv.* **8** 33666
- [10] Liu Y, Fang Y J, Yang D R, Pi X D, Wang P J 2022 *J. Phys.: Condens. Matter* **34** 183001
- [11] Liu C Y, Zhang H, Ding K, Zhao J, Yan A J, Luo J S, Ye L J, Tang Y, Pang D, Li H L, Dong K L, Li W J, Cheng Z X, Yu P 2026 *Adv. Mater.* **38** e16019
- [12] Fu Q M, Peng J L, Yao Z C, Zhao H Y, Ma Z B, Tao H, Tu Y F, Tian Y, Zhou D, Han Y B 2020 *Appl. Surf. Sci.* **527** 146923
- [13] Zheng H R, Jiang Y R, Yang S Y, Zhang Y, Yan X F, Hu J M, Shi Y S, Zou B S 2020 *J. Alloys Compd.* **812** 152158
- [14] Tran M H, Bae J-S, Hur J 2022 *Appl. Surf. Sci.* **604** 154528
- [15] Goswami L, Aggarwal N, Vashishtha P, Jain S K, Nirantar S, Ahmed J, Khan M A M, Pandey R, Gupta G 2021 *Sci. Rep.* **11** 10859
- [16] Liu Z, Zhi Y S, Zhang M L, Yang L L, Li S, Yan Z Y, Zhang S H, Guo D Y, Li P G, Guo Y F, Tang W H 2022 *Chin. Phys. B* **31** 088503
- [17] Zhao J, Yu J H, Luo J S, Li S Y, Zheng Q Q, Qin G P, Pang D, Tang Y, Li H L, Ye L J, Zhang H, Li W J 2026 *Appl. Surf. Sci.* **731** 166416
- [18] Zhai K, Zhang H, Li S Y, Chen J N, Zhou P K, Cui H, Pang D, Tang Y, Ye L J, Li H L, Li W J 2026 *Sci. China Mater.* **69** 1420
- [19] Pan X H, Zhang T, Lu Q Q, Wang W H, Ye Z Z 2019 *RSC Adv.* **9** 37201
- [20] Ye Y F 2018 *J. Mater. Sci.-Mater. El.* **29** 4967
- [21] Fei X M, Jiang D Y, Zhao M, Deng R 2021 *Nanotechnology* **32** 205401
- [22] Cossuet T, Resende J, Rapenne L, Chaix-Pluchery O, Renou G, Pearson A, Hoye R, Blanc-Pelissier D, Nguyen N D, Appert E, Muñoz-Rojas D, Consonni V, Deschanvres J-L 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1803142
- [23] Gupta A A, Arunachalam S, Cloutier S G, R. Izquierdo 2018 *ACS Photonics* **5** 3923
- [24] Wang S L, Wang Y C, Guo D Y, Li C R, Liu A P 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 128502 (in Chinese) [王顺利, 王亚超, 郭道友, 李超荣, 刘爱萍 2021 *物理学报* **70** 128502]
- [25] Zhang S Y, Xia K L, Zhang M L, Bian A, Liu Z, Guo Y F, Tang W H 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 067301 (in Chinese) [张盛源, 夏康龙, 张茂林, 边昂, 刘增, 郭宇锋, 唐为华 2024 *物理学报* **73** 067301]
- [26] Lin H L, Wei L, Wu C C, Chen Y X, Yan S S, Mei L M, Jiao J 2016 *Nanoscale Res. Lett.* **11** 420
- [27] Wang Y Q, Chen L L, Zhou H, Wei K, Zhu Z R, Xie E Q, Cao W B, Han W 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 8011
- [28] Ni D W, Wang Y J, Li A S, Huang L, Tang H L, Liu B, Cheng C W 2022 *Nanoscale* **14** 3159
- [29] Chen X H, Xu Y, Zhou D, Yang S, Ran F F, Lu H, Tang K, Gu S L, Zhang R, Zheng Y D, Ye J D 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 36997
- [30] Zhao B, Wang F, Chen H Y, Zheng L X, Su L X, Zhao D X, Fang X S 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1700264
- [31] Hilfiker M, Korlacki R, Jinno R, Cho Y J, Xing H G, Jena D, Kilic U, Stokey M, Schubert M 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 062103
- [32] Pearton S J, Aitkaliyeva A, Xian M H, Ren F, Khachatryan A, Ildefonso A, Islam Z, Jafar Rasel M A, Haque A, Polyakov A Y, Kim J 2021 *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **10**

- [33] Xing M J, Jiang D Y, Zhao M 2023 *Appl. Surf. Sci.* **618** 156705
- [34] Umar A, Ribeiro C, Al-Hajry A, Masuda Y, Hahn Y B 2009 *J. Phys. Chem. C* **113** 14715
- [35] Abbas K N, Bidin N, Sabry R S, Al-Asedy H J, Al-Azawi M A, Islam S 2016 *Mater. Chem. Phys.* **182** 298
- [36] Alim K A, Fonoberov V A, Balandin A A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 053103
- [37] Zeferino R S, Flores M B, Pal U 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 014308
- [38] Curcio A L, de Godoy M P F, De Giovanni Rodrigues A 2024 *Appl. Nanosci.* **14** 269
- [39] Grümbel J, Goldhahn R, Jeon D W, Feneberg M 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 022104
- [40] He C R, Guo D Y, Chen K, Wang S L, Shen J Q, Zhao N, Liu A P, Zheng Y Y, Li P G, Wu Z P, Li C R, Wu F M, Tang W H 2019 *ACS Appl. Nano Mater.* **2** 4095
- [41] Pandey R M, Boddu S N, Sudarsan V, Pandey M, Kshirasagar R J, Vatsa R K 2014 *AIP Conf. Proc.* **1591** 426
- [42] Kerr L L, Li X N, Canepa M, Sommer A J 2007 *Thin Solid Films* **515** 5282
- [43] Alenezi M R, Almeshal A M, Alkhaledi A N F N R 2022 *Materials Advances* **3** 6577
- [44] Li J, Wang R, Bai Z W, Wang G, Zhang X M, Yuan J S, Zhou J Y, Xie E Q, Pan X J 2023 *Sensor. Actuat. A: Phys.* **358** 114434
- [45] Zhang M X, Liu Y, Yang M Q, Zhang W, Zhou J Y, Zhang Z X, Xie E Q, Pan X J, Li S B 2018 *Appl. Surf. Sci.* **452** 43
- [46] Tang K, Jiang M M, Yang B W, Xu T, Liu Z, Wan P, Kan C X, Shi D N 2023 *Nanoscale* **15** 2292
- [47] Zhu L H, Gu X H, Qu F D, Zhang J Q, Feng C H, Zhou J R, Ruan S P, Kang B N 2013 *J. Am. Ceram. Soc.* **96** 3183
- [48] Li X S, Liu X, Li Y D, Gao D H, Cao L Z 2021 *IEEE Access* **9** 11954
- [49] Wang N, Jiang D Y 2021 *J. Mater. Sci.* **56** 5708
- [50] Wang G, Bai Z W, Wu H C, Zhang X M, Li J, Jin M J, Zhou J Y, Xie E Q, Pan X J 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 111101
- [51] Guo D Y, Zhao X L, Zhi Y S, Cui W, Huang Y Q, An Y H, Li P G, Wu Z P, Tang W H 2016 *Mater. Lett.* **164** 364
- [52] Liu Z, Liu Y Y, Wang X, Li W J, Zhi Y S, Wang X L, Li P G, Tang W H 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 045707
- [53] Abdalla A, Khan I, Sohail M, Qurashi A 2019 *Sol. Energy* **181** 333
- [54] Zhang J H, Jiao S J, Wang D B, Ni S M, Gao S Y, Wang J Z 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 6867
- [55] Wang G, Zhang X M, Li J, Bai Z W, Wu H C, Jin M J, Zhou J Y, Xie E Q, Pan X J 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 071101
- [56] Francis B, Sebastian R, Dixit T, Ganapathi K L, Rao M S R 2023 *Semicond. Sci. Technol.* **38** 015011
- [57] Chen J, Wang Z H, He H F, Mao J X, Zhang Y, Zhang Q F, Li M K, Lu Y M, He Y B 2021 *Adv. Electron. Mater.* **7** 2100717
- [58] Mei T, Li S, Zhang S H, Liu Y Y, Li P G 2022 *Phys. Scr.* **97** 015808
- [59] Xu F Y, Yan W J, Pang D, Ren B N, Tang Q X, Wang X, Tan G Y, Li H L, Xiong Y Q, Tang Y, Ye L J, Kong C Y, Zhang H, Li W J 2024 *Opt. Mater.* **150** 115185

Wire-shaped ZnO/ α -Ga₂O₃ Heterostructure Nanorod Arrays Photoelectrochemical Type Ultraviolet Photodetector*

LI Jiang¹⁾ WANG Shimin¹⁾ JIN Mengjing¹⁾ ZHOU Jinyuan¹⁾ CHANG Peng¹⁾ WANG Gang^{2)†}

PAN Xiaojun^{1)††}

1) (School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2) (School of Electronic Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Keywords: ZnO/ α -Ga₂O₃, nanorod arrays, heterojunction, barrier layer, ultraviolet photodetector

*Project supported by the Natural Science Foundation of Gansu Province (25JRRA731), Fundamental Research Funds for the Central Universities (561224002), Gansu Province Postgraduate Innovation Star Program (2025CXZX-041), Gansu Provincial Higher Education Institutions Faculty Innovation Fund Project (2026B-183), Lanzhou City University Doctoral Research Fund Project (LZCU-BS2025-05).

†Corresponding author. E-mail: wangg@lzcw.edu.cn

††Corresponding author. E-mail: E-mail:xjpan@lzu.edu.cn

Abstract

The one-dimensional nanoarray heterostructure exhibits multiple advantages, including direct charge transport channels and an inherent electric field, making it an ideal structure for manufacturing high-performance optoelectronic devices. In this work, the $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanorod arrays (NRAs) heterostructures on titanium substrates are fabricated via the hydrothermal method, and then applied as the photoanodes of photoelectrochemical (PEC) ultraviolet detectors. The built-in electric field generated by the $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ heterojunction enhances the separation efficiency of photogenerated carriers. Moreover, the Ga_2O_3 coating reduces surface states on the ZnO NRAs, further boosting the response rate, while also acting as a barrier layer to minimize carrier recombination at the solid-liquid interface. Under UV irradiation of $200 \mu\text{W cm}^{-2}$, the $\text{ZnO}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ NRAs photoanode detector achieved a photocurrent density of $38.4 \mu\text{A cm}^{-2}$ and a responsivity of 0.17 A W^{-1} —1.55 times higher than that of the detector based on ZnO NRAs photoanode. Additionally, the wire-shaped detector demonstrates excellent linear response across the UV line irradiation angle range from 0° to 360° . This work provides insights for enhancing photogenerated carrier separation efficiency and reducing solid-liquid interface recombination in PEC ultraviolet detectors.

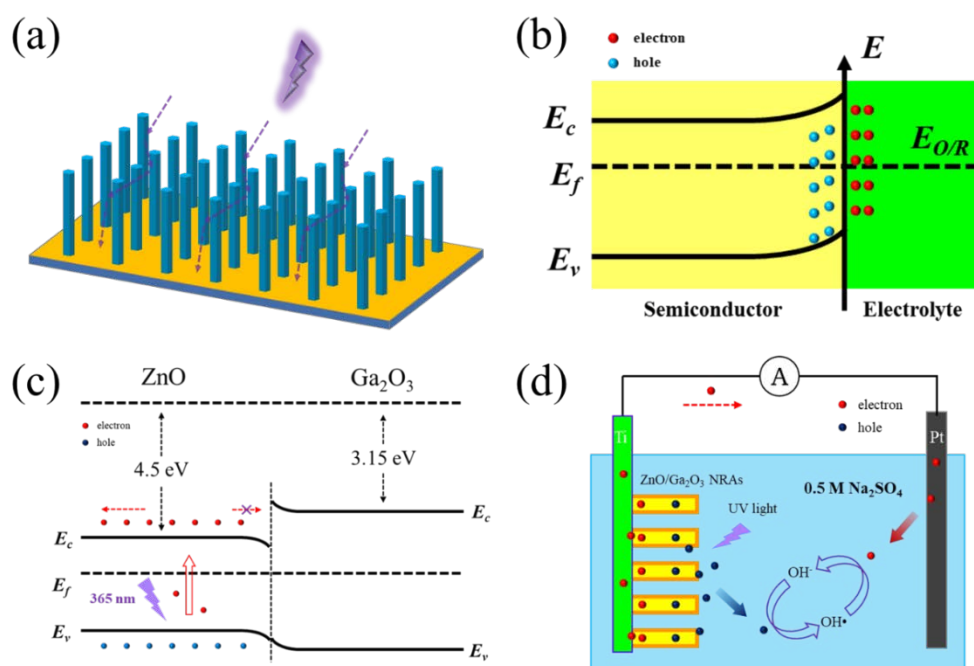


Fig. (a) Schematic structure of the ZnO/α-Ga₂O₃ NRAs under UV radiation; (b) Schematic energy bands at the photoanode/electrolyte interface; (c) Schematic energy bands of the ZnO/α-Ga₂O₃ heterojunction; and (d) Schematic working mechanism of the PEC-type UV photodetectors based on ZnO/α-Ga₂O₃ NRAs.

录用稿件，非最终出版稿