材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024010201

Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料的制备及其紫外光光电探测性能

李丽华，彭韶龙，从文博，王 航，汪钰馨，黄金亮*

（河南科技大学 材料科学与工程学院，河南 洛阳 471000）

摘 要： 分别采用旋涂法和水热法在FTO衬底上制备Co_3O_4种子层和Co_3O_4薄膜，再在Co_3O_4薄膜上水热生长Fe_2O_3纳米棒，获得了高质量的Co_3O_4/Fe_2O_3异质结复合材料。通过改变Fe_2O_3前驱体溶液浓度来改变异质结复合材料中Fe_2O_3组分的含量。结果表明，Fe_2O_3纳米棒覆盖在呈网状结构的Co_3O_4薄膜上，随着Fe_2O_3前驱体溶液浓度即Fe_2O_3组分含量的增加，Co_3O_4/Fe_2O_3异质结复合材料对紫外光的响应逐渐增强，当Fe_2O_3前驱体溶液浓度为0.015 mol/L时，异质结复合材料有着很好的光电稳定性，并表现出较高的响应率(12.5 mA/W)和探测率(4.4×10^{10} Jones)。

关键词： Co_3O_4；紫外光电探测；Co_3O_4/Fe_2O_3复合材料；异质结

中图分类号： TN23；TB332 **文章编号：** 1001－5868(2024)03－0420－06

Preparation and UV Photodetection Properties of a Co_3O_4/Fe_2O_3 Heterojunction Composite

LI Lihua, PENG Shaolong, CONG Wenbo, WANG Hang, WANG Yuxin, HUANG Jinliang

(School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, CHN)

Abstract: In this study, we prepare a Co_3O_4 seed layer and thin film on an FTO substrate using spin-coating and hydrothermal methods, respectively. We then hydrothermally grow Fe_2O_3 nanorods on the Co_3O_4 thin film to obtain high-quality Co_3O_4/Fe_2O_3 heterojunction composite materials. By changing the concentration of the Fe_2O_3 precursor solution, we can alter the contents of the Fe_2O_3 components in the heterojunction composite materials. Results indicated that Fe_2O_3 nanorods covered the Co_3O_4 thin film with a network structure. With an increase in the Fe_2O_3 precursor solution concentration, the response of the Co_3O_4/Fe_2O_3 heterojunction composite material to ultraviolet light gradually increased. When the concentration of the Fe_2O_3 precursor solution was 0.015 mol/L, the heterojunction composite material exhibited good photoelectric stability, a high response rate (12.5 mA/W), and a high detection rate (4.4×10^{10} Jones).

Key words: Co_3O_4; UV photodetection; Co_3O_4/Fe_2O_3 composite; heterojunction

0 引言

光电探测器是利用光电效应将光信号转换为电信号，从而实现对光的探测[1-2]。紫外线探测器的工作波段为紫外光，对紫外辐射具有高响应[3-4]。目前，紫外光电探测器材料一般采用以GaN[5]，SiC[6]，Ga_2O_3[7]，ZnO[8]等为代表的第三代宽带隙半导体，其重要应用场景是处于紫外日盲范围的火焰探测、导弹预警系统和紫外侦察等[9-12]领域。

Co_3O_4是一种具有典型尖晶石结构(AB_2O_4)的

收稿日期：2024－01－02.

*通信作者：黄金亮

p 型磁性金属氧化物半导体，无毒且在地球上储量丰富。它具有两个带隙，1.5 和 2.2 eV[13]，因而可以在 UV-Vis-NIR 波段多波段响应，是一种十分理想的宽光谱光电探测器材料。目前，许多研究人员利用不同的方法来制备各种不同形貌的 Co_3O_4，如立方体、针状、花状、层状等[14-17]，但主要用于电池、光催化等领域，将其用于光电探测材料的研究较少。其中一个原因可能是纯的 Co_3O_4 生成的光生载流子复合较快，严重影响其对光刺激的响应性能。Fe_2O_3 具有适宜的能带结构、良好的载流子迁移速率和良好的铁磁性，在许多领域都有所应用，如光催化等[18-19]。构建异质结可以提高电子-空穴的分离效率[20-21]，因此，能否将 Co_3O_4 与 Fe_2O_3 复合构建异质结来提升 Co_3O_4 电子-空穴的分离效率，从而提升其对紫外光的响应性能值得研究。

本文分别采用旋涂法和水热法在 FTO 衬底上制备 Co_3O_4 种子层和 Co_3O_4 薄膜，再在 Co_3O_4 薄膜上水热生长 Fe_2O_3 纳米棒，构建出 Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料薄膜，研究了其相组成、微观形貌以及 Fe_2O_3 前驱体溶液浓度变化对该复合材料紫外光探测性能的影响。

1　实验

1.1　Co_3O_4 种子层与薄膜的制备

在 FTO 衬底上通过旋涂法制备 Co_3O_4 种子层。首先称取一定量的乙酸钴 $Co(CH_3COO)_3 \cdot 4H_2O$ 溶解在乙二醇甲醚和乙酸中，乙二醇和乙酸的体积比为 2∶1，形成 0.1 mol/L Co_3O_4 籽晶液，搅拌 1 小时，得到种子层的前驱体液。将 FTO（2 cm×5 cm）衬底依次在洗洁精、去离子水、丙酮和乙醇溶液中超声清洗 15 min 并干燥。将所得种子层前驱体溶液以一定的转速在 FTO 衬底上旋涂 20 s，放入 300 ℃的马弗炉内，加热 5 min。重复 3 次。然后在 600 ℃马弗炉内退火 1 h，得到 Co_3O_4 种子层。

称取 15.0 mmol 的 $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ 溶解在 70 mL 去离子水中。搅拌 30 分钟后，向上述溶液中加入 75 mmol 的尿素。再搅拌 30 分钟后，将获得的均匀溶液转移到内衬的高压釜中。然后将有 Co_3O_4 种子层的衬底放入高压釜中密封，并在 100 ℃的保温箱中保持 12 小时。自然冷却至室温，取出样品并清洗干燥，最后在 600 ℃马弗炉内退火 1 h，得到 Co_3O_4 薄膜。

1.2　Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料的制备

将 4.50 mmol $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 和 30.0 mmol 硝酸钠溶解在 30 mL 去离子水中配置成 0.015 mol/L 橙色透明的 Fe_2O_3 前驱体溶液。将溶液转移到内衬的高压釜中，然后再把 Co_3O_4 薄膜放入高压釜中密封，在保温箱中于 100 ℃保持 6 小时。冷却至室温后，用去离子水反复洗涤样品后干燥，最后在 550 ℃下煅烧 4 h，得到 Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料薄膜。将该 Fe_2O_3 前驱体溶液浓度下的样品记为 15-Co_3O_4/Fe_2O_3。用相同的方法制备 0.020，0.010，0.005 mol/L 浓度的 Fe_2O_3 的复合材料，分别标记 05-Co_3O_4/Fe_2O_3，10-Co_3O_4/Fe_2O_3，20-Co_3O_4/Fe_2O_3。

1.3　样品表征和光电测试

采用 X-射线衍射仪（XRD，D8 Advance 型，Cu 靶，$K\alpha$，$\lambda=0.154\ 18$ nm）分析样品的物相组成；采用场发射扫描电子显微镜（FESEM，JSM-7800F 型）分析样品的微观形貌；利用高分辨透射电子显微镜（日本 JEOL JEM 2100Plus）判定核-壳异质结构的构建；采用 X 射线光电子能谱（XPS，美国 Thermo Scientific ESCALAB 250Xi）分析表面特定的元素组成和化学态；用紫外/可见/近红外漫反射测试（日本 Shimadzu UV-3600）等测试 Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料的光学性质。

以氙灯模拟太阳光照，使用电化学工作站（CHI600E 型，Pt 为对电极（CE），Ag/AgCl 为参比电极（RE））对样品进行电化学测试。利用 Zahner PP211 工作站测试其光电性能。工作站自带的光源提供复合光源，再由 LW365 s/n LS 1207 型号的滤光片将光源分成 365 nm 单色光，以此测试复合材料的光电流。

2　结果与讨论

2.1　结构形貌分析

图 1 为 Co_3O_4 和 Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料的 XRD 图谱。样品 Co_3O_4 除了 FTO 衬底的特征峰外，在 2θ 为 19.0°，31.3°，36.8°，59.4°和 65.2°处的衍射峰对应于 Co_3O_4（JCPDS 65-3103）的（111），（220），（311），（511）和（440）晶面。Fe_2O_3 的引入明显降低了 Co_3O_4 的衍射峰强度，且能够在高于 600 ℃退火处理的 Co_3O_4 样品上观察到 Fe_2O_3（JCPDS 33-0664）的特征峰[22-23]。其主要衍射峰

24.1°,33.1°,35.6°,40.5°和49.5°分别对应于Fe_2O_3的(012),(104),(110),(113)和(024)晶面。

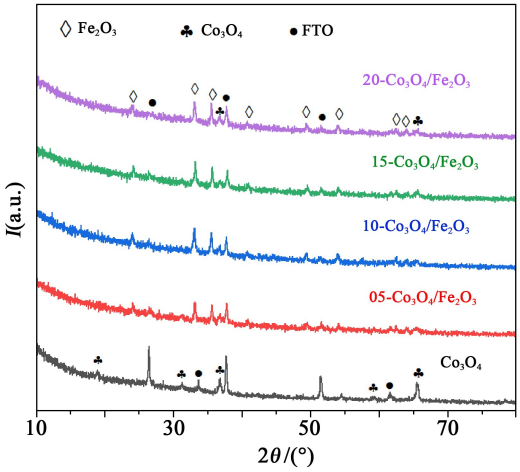


图1 不同Fe_2O_3前驱体溶液浓度下Co_3O_4/Fe_2O_3异质结复合材料的XRD图

图2为Co_3O_4,Fe_2O_3及Co_3O_4/Fe_2O_3异质结复合材料的SEM图。可以看出,制备的Co_3O_4薄膜呈纳米线簇构成的网状结构,其内部空隙大(图2(a));而在FTO上水热生成的Fe_2O_3为一维棒状结构(图2(b)),这种一维阵列结构可以促进光子接触,也为光生载流子提供了独特的传输通道,有利于

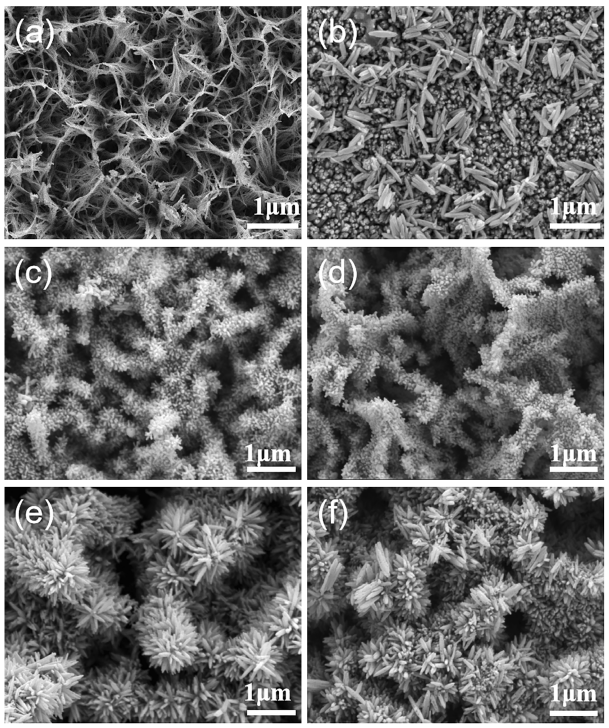
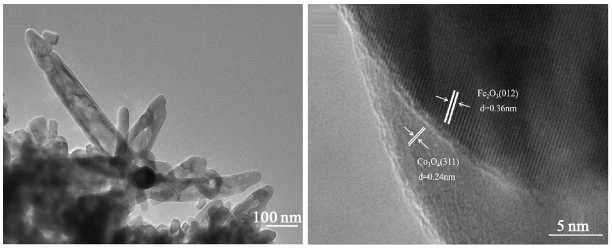


图2 几种材料的SEM图。(a)Co_3O_4;(b)Fe_2O_3;(c)05-Co_3O_4/Fe_2O_3;(d)10-Co_3O_4/Fe_2O_3;(e)15-Co_3O_4/Fe_2O_3;(f)20-Co_3O_4/Fe_2O_3

提高量子效率[24]。经水热法将Co_3O_4薄膜和Fe_2O_3复合后,Co_3O_4表面被Fe_2O_3所覆盖,如图2(c)~(f)所示。随着Fe_2O_3前驱体溶液浓度的增大,Fe_2O_3纳米棒逐渐变粗变长。在15-Co_3O_4/Fe_2O_3异质结复合材料中,Fe_2O_3在Co_3O_4上的分布相对均匀。

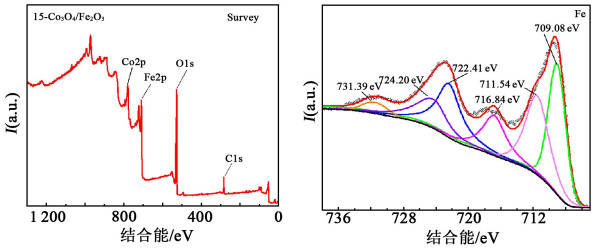
采用TEM和HRTEM进一步研究了15-Co_3O_4/Fe_2O_3的形貌。从图3(a)可以看出,Fe_2O_3覆盖在Co_3O_4纳米线上。在图3(b)中发现,Fe_2O_3的(012)晶面,其对应晶格间距$d=0.36$ nm,而晶格间距$d=0.24$ nm则对应Co_3O_4的(311)晶面,与XRD结果相吻合。



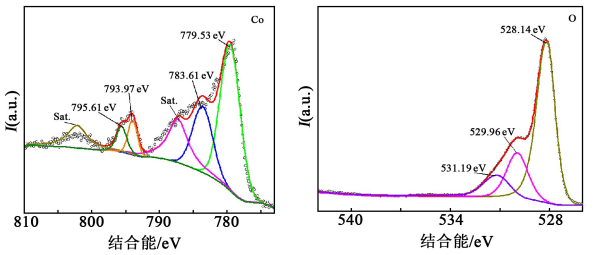
(a) TEM (b) HRTEM

图3 15-Co_3O_4/Fe_2O_3样品的TEM和HRTEM图

用XPS方法进一步研究了制备材料的表面化学键态,如图4所示。所有特征峰位置均根据C1s在284.80 eV时的结合能进行校正。图4(a)所示Co_3O_4/Fe_2O_3异质结复合材料的XPS测量光谱均观察到Co2p,Fe2p和O1s信号,未检测到其他元素。图4(b)所示Fe_2O_3的Fe2p图中,709.08和722.41 eV的峰值分别对应Fe^{2+}离子的$Fe2p_{3/2}$和$Fe2p_{1/2}$[25],而711.54和724.20 eV的峰值分别对应Fe^{3+}离子的$Fe2p_{3/2}$和$Fe2p_{1/2}$[26]。位于717.8和732.5 eV处的峰与纳米级赤铁矿中常见的卫星峰有关[26]。图4(c)所示Co_3O_4的Co2p图中,779.53和793.97 eV的峰值分别对应Co^{3+}的$Co2p_{3/2}$和$Co2p_{1/2}$[25],而783.61和795.61 eV的峰值分别对应Co^{2+}的$Co2p_{3/2}$和$Co2p_{1/2}$,同时803.4和786.1 eV的峰是两个卫星峰[27]。在图4(d)所示的O1s中,



(a) 全谱 (b) Fe2p



(c) Co2p　　(d) O1s

图 4　15-Co_3O_4/Fe_2O_3 的 XPS 谱和四种 XPS 价带谱

528.14，529.96，531.19 eV 和的 3 个特征峰，分别对应吸附晶格氧，吸附氧，吸附 OH 基团的氧[28]。

2.2　光学和光电化学性质

通过对紫外-可见光谱的测量，评价了所制备的 Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料的光学响应，如图 5 所示。图中 Co_3O_4 的吸收光谱清晰地显示了 1.5 和 2.2 eV 时的双带隙[29]，与 Fe_2O_3 复合后，对紫外光的吸收显著增强[30]。样品 15-Co_3O_4/Fe_2O_3 在 300～460 nm 区域表现出最强的光吸收。

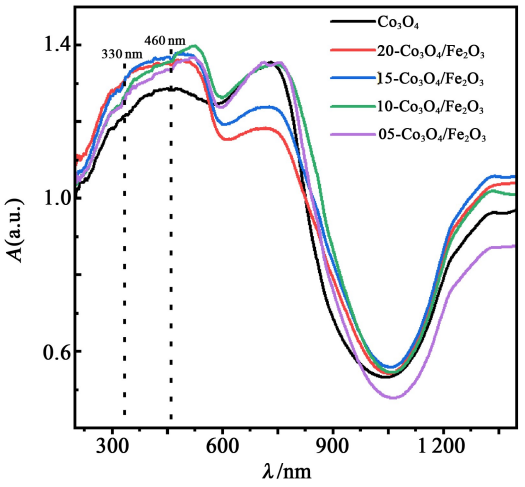
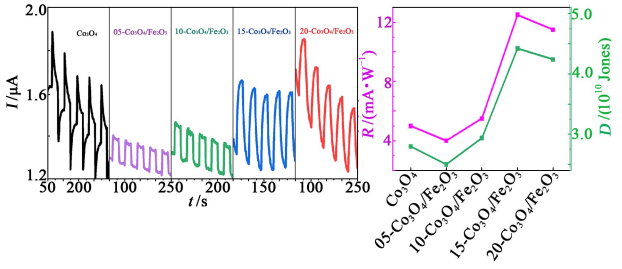


图 5　Co_3O_4 和 Co_3O_4/Fe_2O_3 复合材料的吸收光谱图

使用电化学工作站自带的光源和 365 nm 的滤光片，测得样品在 365 纳米波长(20 $\mu W/cm^2$)、开关周期为 20 s 的光照下的 I-t 图，如图 6(a)所示。可见，相比于 Co_3O_4，Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料表现出良好的光响应和稳定性，样品 15-Co_3O_4/Fe_2O_3 表现出的性能最好。

响应率(R)与光产生电流有关，该电流定义为光电探测器输出信号与输入光功率的比值。可以表示为 $R=\Delta I/(PS)$，其中 $\Delta I=I_{illuminated}-I_{dark}$；$I_{illuminated}$ 和 I_{dark} 分别为光电流和暗电流，P 为入射光的功率密度，S 为光接收区域。探测率(D)是描述光电探测器检测能力的一个参数，它与暗电流和响应率密切相关。探测率 D 可由暗电流和响应率计算，由 $D=RS^{1/2}/(2eI_{dark})^{1/2}$ 得出，其中 R 为光电探测器的响应率，S 和 I_{dark} 分别表示有效照明面积和暗电流，e 为电子电荷。

根据器件的光电流，计算了各给样品的响应率和探测率，结果表明 Co_3O_4 与 Fe_2O_3 复合后的样品的 R 和 D 都增加了，如图 6(b)所示。其中性能最好的样品 15-Co_3O_4/Fe_2O_3 的响应率和探测率分别为 $R=12.5$ mA/W 和 $D=4.4\times10^{10}$ Jones，相比与 Co_3O_4 的响应率 $R=5$ mA/W 有着很大的提升，而且具有一定的稳定性。



(a) I-t 图　　(b) 响应率和探测率

图 6　在 365 nm 光照下样品的 I-t 图以及样品的响应率和探测率

将 Co_3O_4/Fe_2O_3 的相关性能与文献进行了对比，其结果如表 1 所示。

表 1　Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料紫外光电探测性能与相关文献的对比

光电探测器	探测范围	λ/nm	R/(mA·W^{-1})	D/Jones	文献
ZnO/Ga_2O_3	UVC	266	9.7	6.29×10^{12}	[31]
ZnO	UVA	365	2.65	5.25×10^{10}	[32]
Polyaniline/MgZnO	UVC	250	0.16	1.5×10^{11}	[33]
Co_3O_4/Fe_2O_3	UV-vis	365	12.5	4.4×10^{10}	本实验

3　结论

采用旋涂和水热法在 Co_3O_4 表面上复合 Fe_2O_3，构建 Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料。在波长为 365 nm 的紫外光下，Co_3O_4/Fe_2O_3 异质结复合材料有着良好的响应率和探测率，其中当 Fe_2O_3 前驱体溶液浓度为 0.015 mol/L 时性能最好，其响应率和探测率分别为 12.5 mA/W 和 4.4×10^{10} Jones。这为高性能紫外光电探测器方向提供了新思路。

参考文献：

[1]　刘　宇，林志诚，王鹏飞，等. 超宽带光电探测器研究进展[J]. 红外与毫米波学报，2023，42(2)：169-187.
Liu Yu，Lin Zhicheng，Wang Pengfei，et al. Research progress

of ultra-broadband photodetectors[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2023, 42(2): 169-187.

[2] 关宇锋. 硅基宽光谱光电探测器的研究[D]. 吉林大学, 2023.
Guan Yufeng. Research on silicon based wide spectrum photodetectors[D]. Jilin University, 2023.

[3] Li C X, Liu Y T, Zhang K, et al. Study on multiple receiver systems in non-line-of-sight ultraviolet communication systems [J]. J. of China Univ. Posts Telecommun., 2014, 21(2): 104-108.

[4] Ulianova V, Zazerin A, Pashkevich G, et al. High performance ultraviolet radiation sensors based on zinc oxide nanorods[J]. Sens. Actuators, A, 2015, 234: 113-119.

[5] 郭 越, 孙一鸣, 宋伟东. 多孔 GaN/CuZnS 异质结窄带近紫外光电探测器[J]. 物理学报, 2022, 71(21): 350-358.
Guo Yue, Sun Yiming, Song Weidong. Narrowband near-ultraviolet photodetector fabricated from porous GaN/CuZnS heterojunction[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(21): 350-358.

[6] 张 峰, 付 钊, 张泽阳, 等. 宽禁带半导体 SiC 紫外光电探测器研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(2): 254-268.
Zhang Feng, Fu Zhao, Zhang Zeyang, et al. Research progress of wide band gap semiconductor SiC ultraviolet photodetectors [J]. J. of Xiamen University: Natural Science, 2023, 62(2): 254-268.

[7] 何 彬, 邢 杰, 段艳廷, 等. Ga_2O_3 紫外光探测器的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(2): 157-163.
He Bin, Xing Jie, Duan Yanting, et al. Research progress of Ga_2O_3 UV photodetectors[J]. Materials Review, 2013, 27(2): 157-163.

[8] 韦 敏, 邓 宏, 邓雪然. ZnO 基紫外光电探测材料研究[J]. 电子元件与材料, 2012, 31(9): 82.
Wei Min, Deng Hong, Deng Xueran. Study on ZnO-based UV photoelectric detection materials[J]. Electronic Components and Materials, 2012, 31(9): 82.

[9] 戴松嗌, 祁洪飞, 刘大博, 等. Ag/TiO_2/ITO 紫外探测器的制备及其光电性能[J]. 航空材料学报, 2016, 36(6): 74-78.
Dai Songyan, Qi Hongfei, Liu Dabo, et al. Preparation of Ag/TiO_2/ITO UV detector and its photoelectronic properties[J]. J. of Aeronautical Materials, 2016, 36(6): 74-78.

[10] Hu J, Chen J, Ma T, et al. Research advances in ZnO nanomaterials-based UV photode tectors: A review[J]. Nanotechnology, 2023, 34(23): 232002.

[11] Li Z, Yan T, Fang X. Low-dimensional wide-bandgap semiconductors for UV photodetectors[J]. Nat. Rev. Mater., 2023, 8(9): 587-603.

[12] 尚续衡, 李亚平, 樊志琴. MoS_2/ZnO 异质结及其在光电探测器中的研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2023, 29(1): 1-11.
Shang Xuheng, Li Yaping, Fan Zhiqin. Research progress in MoS_2/ZnO heterostructure and applications in photodetectors [J]. J. of Functional Materials and Devices, 2023, 29(1): 1-11.

[13] Patel M, Kumar M, Kim H S, et al. Reactive sputtering growth of Co_3O_4 thin films for all metal oxide device: a semitransparent and self-powered ultraviolet photodetector [J]. Mater. Sci. Semicond. Process., 2018, 74: 74-79.

[14] Li M H, Oh W D, Lin K Y A, et al. Development of 3-dimensional Co_3O_4 catalysts with various morphologies for activation of oxone to degrade 5-sulfosalicylic acid in water [J]. Sci. Total Environ., 2020, 724: 138032.

[15] Ren Q, Mo S, Peng R, et al. Controllable synthesis of 3D hierarchical Co_3O_4 nanocatalysts with various morphologies for the catalytic oxidation of toluene[J]. J. Mater. Chem. A, 2018, 6(2): 498-509.

[16] Liu W, Liu R, Zhang X. Controllable synthesis of 3D hierarchical Co_3O_4 catalysts and their excellent catalytic performance for toluene combustion[J]. Appl. Surf. Sci., 2020, 507: 145174.

[17] Kong Q, Feng W, Xie X, et al. Morphology-controlled synthesis of Co_3O_4 materials and its electrochemical catalytic properties towards oxygen evolution reaction[J]. Catal. Lett., 2018, 148(12): 3771-3778.

[18] Sabouri Z, Labbaf S, Karimzadeh F, et al. Fe_3O_4/bioactive glass nanostructure: A promising therapeutic platform for osteosarcoma treatment[J]. Biomed. Mater., 2021, 16(3): 035016.

[19] Zhu B, Song D, Jia T, et al. Effective visible lightdriven photocatalytic degradation of ciprofloxacin overflower-like Fe_3O_4/Bi_2WO_6 composites[J]. ACS Omega, 2021, 6(2): 1647-1656.

[20] Chao G, Zhang L, Tian J, et al. Pd-SnO_2: Heterojunction catalysts anchored on graphene sheets for enhanced oxygen reduction[J]. Compos. Commun., 2021, 25: 100703.

[21] Sha M A, Meenu P C, Sumi V S, et al. Tuning of electron transfer by Ni-P decoration on CeO_2-TiO_2 heterojunction for enhancement in photocatalytic hydrogengeneration [J]. Mater. Sci. Semicond. Process., 2020, 105: 104742.

[22] Wang F, Ou R, Yu H, et al. Photoelectrocatalytic PNP removal using C_3N_4 nanosheets/α-Fe_2O_3 nanoarrays photoanode: Performance, mechanism and degradation pathways[J]. Appl. Surf. Sci., 2021, 565: 150597.

[23] 张英芳, 马红超, 吕佳慧. Z 型异质结构 Co_3O_4-Fe_2O_3 复合物的制备及光电催化性能[J]. 大连工业大学学报, 2021, 40(4): 285-290.
Zhang Yingfang, Ma Hongchao, Lv Jiahui. Preparation and photoelectrocatalytic performance of Z-type heterostrunction Co_3O_4-Fe_2O_3 composites [J]. J. of Dalian Polytechnic University, 2021, 40(4): 285-290.

[24] Kuryatkov V, Chandolu A, Borisov B, et al. Solar-blind ultraviolet photodetectors based on superlattices of AlN/

AlGa(In)N[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 82(9): 1323-1325.

[25] Han M, Hu L, Zhou Y, et al. Z-scheme in a $Co_3(PO_4)_2/\alpha$-Fe_2O_3 photocatalysis system for overall water splitting under visible light[J]. Catal. Sci. Technol., 2018, 8(3): 840-846.

[26] Yan S, Shi Y, Tao Y, et al. Enhanced persulfate-mediated photocatalytic oxidation of bisphenol A using bioelectricity and a g-C_3N_4/Fe_2O_3 heterojunction[J]. Chem. Eng. J., 2019, 359: 933-943.

[27] Yang Y, Zhu C, Zhang Y, et al. Construction of Co_3O_4/Fe_2O_3 nanosheets on nickel foam as efficient electrocatalyst for the oxygen evolution reaction[J]. J. Phys. Chem. Solids, 2021, 148: 109680.

[28] Liu W, Xiang W, Guan N, et al. Enhanced catalytic performance for toluene purification over Co_3O_4/MnO_2 catalyst through the construction of different Co_3O_4-MnO_2 interface[J]. Sep. Purif. Technol., 2022, 278: 119590.

[29] Mahala P, Patel M, Ban D K, et al. High-performing self-driven ultraviolet photodetector by TiO_2/Co_3O_4 photovoltaics [J]. J. Alloys Compd., 2020, 827: 154376.

[30] Duan B, Mei L. A *Z*-scheme Fe_2O_3/g-C_3N_4 heterojunction for carbon dioxide to hydrocarbon fuel under visible illuminance[J]. J. Colloid Interf. Sci., 2020, 575: 265-273.

[31] Zhao B, Wang F, Chen H, et al. An ultrahigh responsivity (9.7 mA·W^{-1}) self-powered solar-blind photodetector based on individual ZnO-Ga_2O_3 heterostructures[J]. Adv. Funct. Mater., 2017, 27: 1700264.

[32] Boruah B D, Misra A. Energy-efficient hydrogenated zinc oxide nanoflakes for high performance self-powered ultraviolet photodetector[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016, 8(28): 18182-18188.

[33] Chen H, Yu P, Zhang Z, et al. Ultrasensitive self-powered solar-blind deep-ultraviolet photodetector based on all-solid-state polyaniline/MgZnO bilayer[J]. Small, 2016, 12(42): 5809-5816.

作者简介：

李丽华(1979—)，女，山西省孝义市人，博士，副教授，主要从事半导体纳米材料的研究；

黄金亮(1963—)，男，河南省南阳市人，博士，教授，主要从事光电薄膜材料的研究。