

不同形貌氧化锌微米晶体的水热法控制合成

陈 杨^{1,2}, 王芙蓉¹, 仇一朵², 黄宇桐², 赵晓君², 潘勤鹤²

(1. 海南大学物理与光电工程学院, 2. 化学化工学院, 海口 570228)

摘要 采用水热合成-活化刻蚀联用法合成了6种不同形貌(棒状、管状、螺丝状、棒状花簇、管状花簇和螺丝花簇)的氧化锌粒子. 通过调节水热反应参数实现了对氧化锌从棒状分散形态到聚集簇的可控合成; 并利用氧化锌晶面的稳定性差异, 通过定制化后刻蚀法, 有效控制氧化锌形貌从棒状到中空管状和螺丝棒状的演变. 光电化学测试结果表明, 氧化锌的差异性形貌特征直接影响其光电化学性质. 本文工作对合成特定形貌的氧化锌来应对不同应用场景的定制化需求具有参考价值.

关键词 氧化锌; 晶体形貌; 控制合成; 光电化学性质

中图分类号 O611.4

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20250208

Controlled Synthesis of Zinc Oxide Microcrystals with Distinct Morphologies via Hydrothermal Method

CHEN Yang^{1,2}, WANG Fuxiang^{1*}, QIU Yiduo², HUANG Yutong², ZHAO Xiaojun^{2*}, PAN Qinhe²

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering,

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract A method of hydrothermal synthesis coupled with activation etching was employed to synthesize zinc oxide (ZnO) particles with six distinct morphologies: rod, tube, screw, rod-flower, tube-flower, and screw-flower. The controlled synthesis of ZnO from dispersed rods to aggregated rod-flower clusters was achieved by adjusting the parameters of the hydrothermal reaction. Moreover, by exploiting the differences in the stability of various crystal faces, a customized post-etching method was used to effectively control the morphological evolution of ZnO from rod-like structure to tubular and screw-like structures. The results of photoelectrochemical test indicated that the distinct morphology of ZnO played a significant role in its photoelectrochemical property. These findings offer valuable insights into the synthesis of ZnO with specific morphologies to tailor its properties for particular application.

Keywords Zinc oxide; Crystal morphology; Controlled synthesis; Photoelectrochemical property

氧化锌(ZnO)作为一种II-VI族宽禁带半导体材料, 因其优异的光电特性和化学稳定性, 在光催化、光电催化、光伏器件及光电化学传感等领域都展现出了重要的应用价值^[1-3]. 通过微结构调控可显著改善氧化锌的光吸收效率、载流子分离能力和表面反应活性, 这对提升其光化学和光电化学性能至

收稿日期: 2025-07-28. 网络首发日期: 2025-11-20.

联系人简介: 王芙蓉, 女, 博士, 副研究员, 主要从事表面和块体材料多极非线性光学方面的研究. E-mail: fuxiang.wang@hainanu.edu.cn

赵晓君, 男, 博士, 副教授, 主要从事新型功能多孔材料合成及光电协同催化方面的研究. E-mail: zhaox@hainanu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22461016, 22361017)、海南省自然科学基金(批准号: 524MS027)和海南省院士创新平台科研项目(批准号: YSPTZX202321)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos. 22461016, 22361017), the Hainan Provincial Natural Science Foundation, China(No. 524MS027) and the Specific Research Fund of the Innovation Platform for Academicians of Hainan Province, China (No. YSPTZX202321).

关重要^[4-7]. 氧化锌的晶面取向、比表面积和缺陷态密度等结构参数与其光生电子-空穴对复合率之间存在显著相关性^[8-10], 而精确调控其晶体形貌是优化这些参数的关键因素^[5, 11-13].

为了调控 ZnO 粒子的形貌, 研究人员开发了多种合成方法. 其中, 水热法和溶剂热法是制备 ZnO 粒子的主要方法^[14-18], ZnO 粒子的形貌在很大程度上由反应的温度、压力和时间所决定. 此外, 其它合成技术也被用于制备具有特定形貌的 ZnO 粒子. 例如, 模板辅助合成法是利用软模板或硬模板来调节粒子的尺寸和形貌^[19-21]; 喷雾热解法则是将喷射到加热基底上的前驱体溶液进行热分解, 从而得到形貌独特的 ZnO^[22, 23]; 还可采用固态反应法, 将 ZnO 前驱体与还原剂或氧化剂一起加热, 以获得所需的尺寸、形状或形貌的 ZnO 粒子^[24-26]. 而且, ZnO 晶体通常为六方纤锌矿结构, 不同晶面的化学活性存在显著差异^[27], 可利用酸^[28]、碱^[29]、盐溶液^[30]、过氧化氢^[31]、超声^[32]、表面活性剂^[33]、染料敏化^[34]及等离子体^[35]等进行刻蚀, 从而进一步改变其形貌结构.

本文采用水热法与可控蚀刻相结合的策略, 制备了 6 种具有显著差异性形貌特征的 ZnO 微米晶体. 首先, 通过精确调控锌盐/有机碱的初始浓度、晶化温度及反应时间等参数, 合成了微米尺度的棒状 ZnO 及其簇状聚集体; 随后, 利用晶体各向异性生长机制, 通过调控蚀刻参数对棒状结构进行形貌重构, 分别获得了管状、螺丝状、管状花簇及螺丝花簇 4 种不同形貌的 ZnO 晶体. 并系统研究了 ZnO 形貌演变过程及其差异性形貌对光电化学性质的影响. 研究结果有助于深化对 ZnO 晶体形貌调控机制和其物理化学性质之间关联性的理解.

1 实验部分

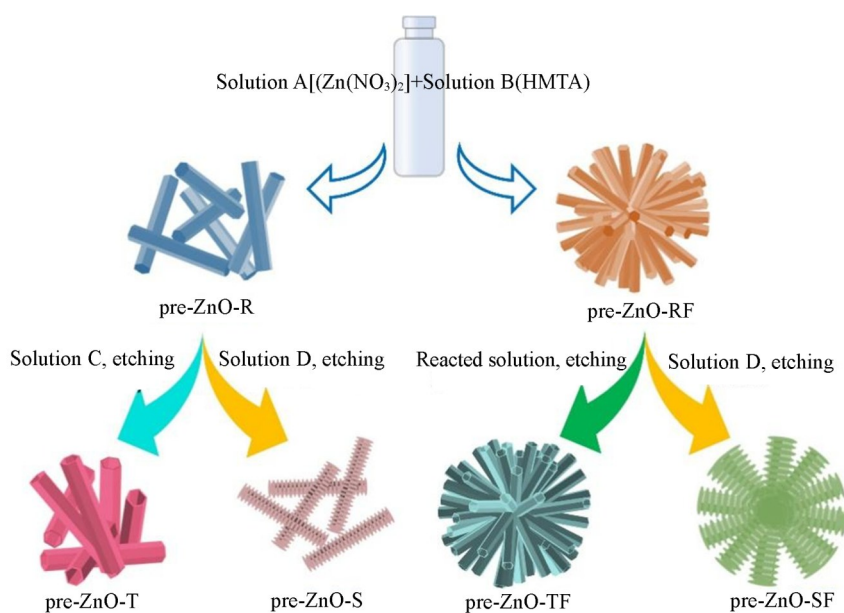
1.1 试剂与仪器

六水合硝酸锌, 分析纯, 西陇科技有限公司; 六次甲基四胺(HMTA), 分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司; 异丙醇(IPA)和硫酸钠, 分析纯, 广州化学试剂厂; Nafion 溶液, 质量分数 5%, 美国 Sigma-Aldrich 公司.

Phenom proX 型扫描电子显微镜, 荷兰 Phenom 公司; Miniflex600 型 X 射线粉末衍射仪, 日本 Rigaku 公司; Lambda750S 型紫外/可见/近红外分光光度计, 美国 Perkin-Elmer 公司; TG-DTA 8122 型差热热重分析仪, 日本 Rigaku 公司; CHI730E 型电化学工作站, 上海辰华仪器有限公司.

1.2 实验过程

Scheme 1 示出了 6 种不同形貌氧化锌微晶的合成流程. 首先, 配置 0.1 mol/L 的硝酸锌水溶液和



Scheme 1 Synthesis process of pre-ZnO crystals with distinct morphologies

0.1 mol/L的六次甲基四胺水溶液,并分别命名为溶液A和溶液B,然后通过调控反应参数来合成不同形貌的ZnO晶体.

1.2.1 棒状ZnO的合成 在25 mL玻璃瓶中加入2 mL溶液A、1 mL溶液B、7 mL去离子水和2 mL异丙醇并搅拌至澄清,在95 °C下加热1 h后自然冷却至室温(r. t.)并静置1 h,用乙醇洗涤后收集到棒状微晶体(pre-ZnO-R).将该晶体在60 °C下干燥后,转移至马弗炉中,在400 °C下退火2 h,得到棒状ZnO,记为ZnO-R.

1.2.2 管状ZnO的合成 在玻璃瓶中加入500 mg pre-ZnO-R和溶液C(2 mL溶液A与4 mL溶液B的混合物),在95 °C下加热2 h后自然冷却并静置6 h;将玻璃瓶重新置于50 °C的烘箱中恒温6 h,然后冷却至室温并静置6 h;前述刻蚀流程(50 °C恒温6 h后冷却至室温并静置6 h)重复3次,将收集到的管状晶体(pre-ZnO-T)在400 °C下退火2 h,得到管状ZnO,记为ZnO-T.

1.2.3 螺丝状ZnO的合成 在玻璃瓶中加入500 mg pre-ZnO-R和溶液D(3 mL溶液B与3 mL去离子水的混合物),在95 °C下加热36 h后自然冷却.将收集到的螺丝状晶体(pre-ZnO-S)在400 °C下退火2 h,得到螺丝状ZnO,记为ZnO-S.

1.2.4 棒状ZnO簇的合成 在玻璃瓶中加入6 mL溶液A、3 mL溶液B和3 mL去离子水并搅拌至澄清,于95 °C下加热12 h后冷却至室温并静置1 h,最后将收集的晶体(pre-ZnO-RF)在400 °C下退火2 h,得到棒状ZnO簇,记为ZnO-RF.

1.2.5 管状ZnO簇的合成 在玻璃瓶中加入6 mL溶液A、3 mL溶液B和3 mL去离子水并搅拌至澄清,于95 °C下加热12 h后冷却至室温并静置1 h,然后转移至50 °C的烘箱中加热6 h,待其自然冷却至室温后静置6 h,该蚀刻过程(50 °C恒温6 h后冷却至室温并静置6 h)重复3次后,收集到管状花簇晶体(pre-ZnO-TF),将该晶体在400 °C下退火2 h后,得到管状ZnO簇,记为ZnO-TF.

1.2.6 螺丝状ZnO簇的合成 与ZnO-S的合成方法相类似,将500 mg pre-ZnO-RF和6 mL溶液D混合,在95 °C下恒温36 h后自然冷却.将收集到的晶体(pre-ZnO-SF)在400 °C下退火2 h,得到管状ZnO簇,记为ZnO-SF.

1.2.7 ZnO的光电化学性能测试 将10 mg ZnO样品和10 μ L Nafion溶液加入到1 mL的水-乙醇(体积比为3:1)混合溶剂中,超声处理30 min得到均匀的悬浮液,将50 μ L悬浮液滴在0.8 cm \times 1.0 cm的FTO片上,晾干后用作工作电极.测试用1 mol/L硫酸钠水溶液作电解液,500 W氙灯作光源,并通过电化学工作站采集数据.

2 结果与讨论

2.1 ZnO的合成与形貌表征

将硝酸锌和HMTA先分别配制成0.1 mol/L的水溶液后再混合,HMTA会缓慢产生OH⁻阴离子,在水热条件下与Zn²⁺离子形成[Zn(OH)₄]²⁻络离子,这有利于ZnO种子的结晶和分散^[32,36].HMTA还可以与ZnO晶体配位,阻碍特定晶面的生长,从而促进形成一维纤锌矿结构^[17,37].在水热反应中,温度偏低会导致ZnO晶体的粒径参差不齐;而随着反应温度的升高,ZnO晶体会逐渐由棒状向多面体转变并有纳米粒子在晶体表面聚集^[38-40].为控制棒状ZnO的生长和形貌,在95 °C下加热硝酸锌和HMTA的混合溶液,合成出棒状pre-ZnO-R和棒状簇pre-ZnO-RF[图1(A)和(D)].为了进一步获得管状和螺丝状ZnO晶体,采取3种刻蚀策略分别对pre-ZnO-R和pre-ZnO-RF进行处理.纤锌矿氧化锌具有极性晶面(0001)和(000 $\bar{1}$)及非极性晶面{10 $\bar{1}$ 0},且(0001)和(000 $\bar{1}$)晶面较高的表面焓导致其稳定性比{10 $\bar{1}$ 0}晶面差^[29,41-44].在50 °C下,将pre-ZnO-R晶体浸泡在新鲜的溶液C中,pre-ZnO-R的(0001)晶面发生选择性刻蚀^[29,42],最终得到管状晶体(pre-ZnO-T)[图1(B)].获得pre-ZnO-TF则采用了不同的刻蚀体系:在棒状簇pre-ZnO-RF晶体生长完成后,对pre-ZnO-RF和反应后溶液反复执行“50 °C-室温”的蚀刻操作,即可获得管状花簇晶体(pre-ZnO-TF)[图1(E)].更为有趣的是,将pre-ZnO-R和pre-ZnO-RF在95 °C的溶液D中加热,都会沿棒状晶体的c轴产生螺纹片状结构[图1(C)和(F)],并且螺纹片的数量会随着蚀刻

时间而变化. 最后, 将合成的6种 ZnO-x 晶体在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下退火, 即得到不同形貌的 ZnO [图2(A)~(F)]. 通过对比图1和图2可以清楚地看到, 最终产物的形貌结构得到了完美保持, 没有出现收缩、开裂、坍塌或破损的现象.

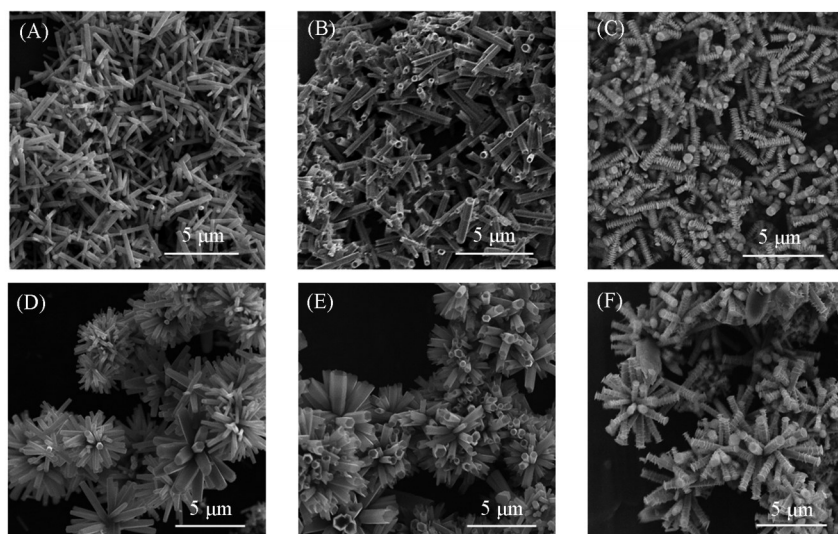


Fig. 1 SEM images of pre-ZnO-R(A), pre-ZnO-T(B), pre-ZnO-S(C), pre-ZnO-RF(D), pre-ZnO-TF(E) and pre-ZnO-SF(F)

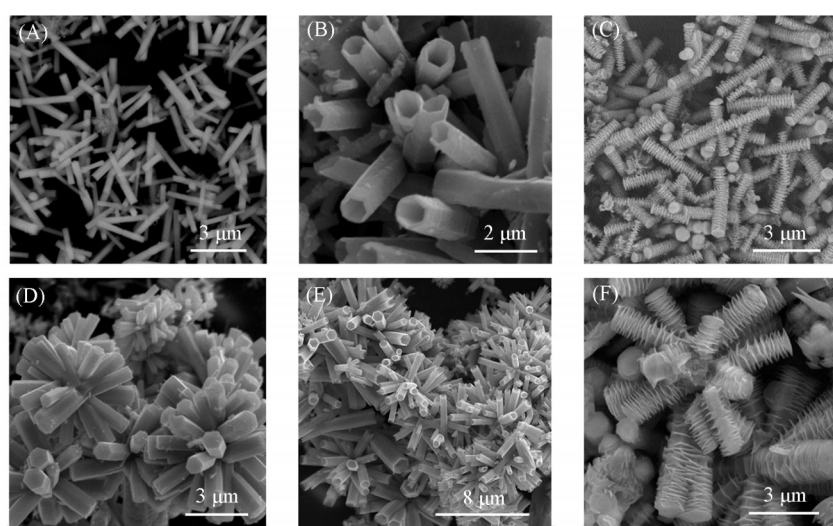


Fig. 2 SEM images of ZnO-R(A), ZnO-T(B), ZnO-S(C), ZnO-RF(D), ZnO-TF(E) and ZnO-SF(F)

2.2 ZnO 的形貌调控

图3示出了不同钴盐/有机碱比例、溶剂、温度、时间下所得 ZnO 的形貌. 可以看出, 在这些条件下均可以获得棒状形貌的 ZnO-R . 但是, 通过对比图3(A)~(C)可以看出, 随着反应时间增长, 棒状晶体的形貌逐渐变得不规则, 因此, 后续实验的反应时间均设置为 1 h . 尽管反应 1 h 的样品形貌总体上符合预期, 但仍有少量棒状簇 ZnO-RF 生成, 为提升 ZnO-R 的尺寸均一性及形貌一致性, 在合成体系中引入了 IPA. IPA 具有优异的溶解性和分散能力, 可以有效促进 ZnO 晶种在反应溶液中的均匀分布. 此外, IPA 作为还原剂, 在合成过程中对控制 ZnO 晶粒尺寸和形貌也至关重要^[17,41]. 最终, 通过在反应体系中引入 IPA 实现了尺寸均一的棒状 ZnO-R 的控制合成, 其长度在 $2.5\sim 3.0\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 直径为 $0.3\sim 0.4\text{ }\mu\text{m}$, 长径比为 $7\sim 8$ [图3(D)].

将合成出的 pre-ZnO-R 晶体分散于溶液 C(溶液 A 和溶液 B 的混合物)中形成悬浮液并在 $95\text{ }^\circ\text{C}$ 进行活化, 然后执行若干轮次“ $50\text{ }^\circ\text{C}$ -室温”蚀刻操作, 从而获得管状 ZnO-T . 由图4(A)~(C)可见, 随着蚀刻

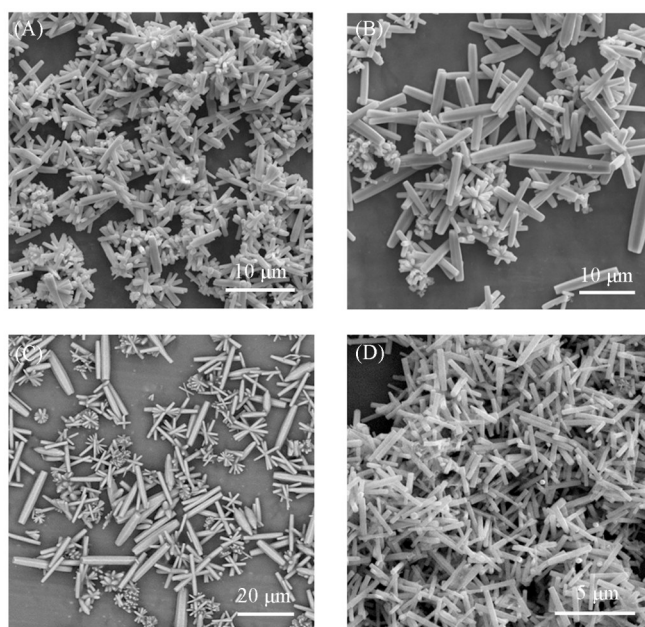


Fig. 3 SEM images of ZnO-R synthesized in water(A—C) and in water/IPA(D)

(A—C) Solution A(2 mL)+solution B(1 mL)+H₂O(9 mL). (A) 95 °C, 1 h+r. t., 1 h; (B) 95 °C, 2 h; (C) 95 °C, 3 h; (D) solution A (2 mL)+solution B(1 mL)+H₂O(7 mL)+IPA(2 mL), 95 °C, 1 h+r. t., 1 h.

轮次的增加,晶体的(0001)晶面出现了非常明显的渐进式蚀刻效果,并在经历3次刻蚀后获得了具有中空管状形貌的ZnO-T.并且在经历过不同轮次的蚀刻处理后,ZnO的长度和直径基本未发生改变.

将预先合成的棒状 pre-ZnO-R 投入到新制备的溶液 D 中(溶液 B 与去离子水等体积混合)并于 95 °C

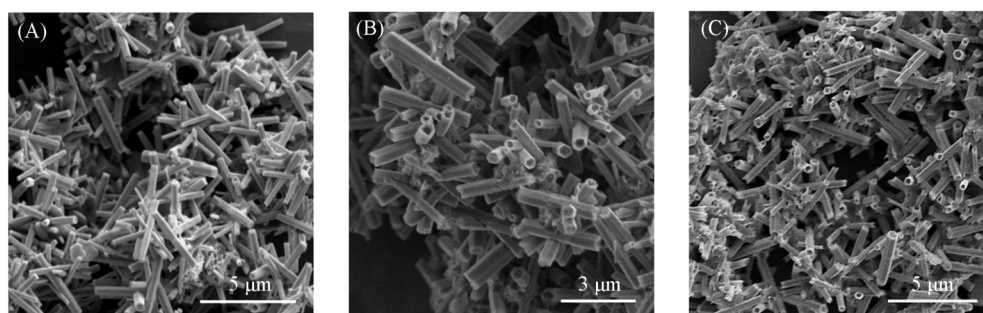


Fig. 4 SEM images of ZnO-T with different etching cycles

Pre-ZnO-R+solution C, 95 °C, 2 h+r. t., 6 h followed by “50 °C-r. t.” etching. (A) 1 cycle etching; (B) 2 cycles etching; (C) 3 cycles etching.

下进行活化刻蚀,反应 36 h 后可观察到沿棒状 ZnO 的 *c* 轴方向出现若干多个螺纹片结构[图 5(A)],且螺纹片的直径保持在 0.3~0.4 μm. 当刻蚀时间延长至 48 h 时,螺纹片发生过度蚀刻,最终形成了杠铃状形貌,杠铃杆的直径减小至 0.2~0.3 μm,但长度没有发生明显改变[图 5(B)]. ZnO 的形貌转变过程揭示了螺纹片形貌与刻蚀时间之间的关联.

为了合成大小均一的棒状簇 ZnO-RF, 首先进行了 Zn²⁺ 与 HMTA 的投料量调控实验(图 6). 在晶体生长过程中,反应溶液浓度的增加会加快成核速率,但可能降低生长速率. 同时,随着反

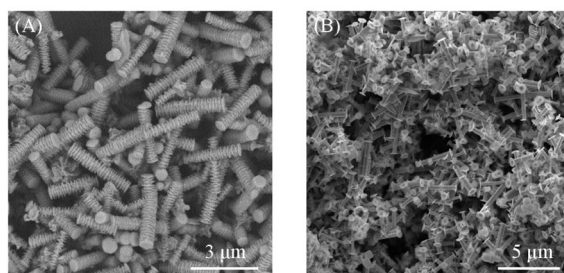


Fig. 5 SEM images of ZnO-S(A) and dumbbell-like ZnO(B)

Pre-ZnO-R+solution D. (A) 95 °C, 36 h+r. t., 1 h; (B) 95 °C, 48 h.

应时间的延长, 溶液中的 $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ 离子会优先吸附到ZnO表面^[45], 引起小尺寸的晶核熟化并重新沉积生长, 促进了ZnO晶体生长成为棒状花簇形貌^[44,46]. 由图6(A)~(C)可知, 初始投料量最高的反应溶液中棒状ZnO的生长速度最慢, 而ZnO-RF的产率最高. 接下来, 在保持 Zn^{2+} 与HMTA投料量不变的前提下, 进一步通过调节反应时间来优化ZnO-RF的结构形貌. 结果表明, 棒状花簇的结晶度和晶化度随着反应时间延长而显著提高[图6(C)~(E)]. 当反应时间达到12 h后, 可合成出粗细和长度均一的棒状簇ZnO-RF, 簇中ZnO棒的长度约为2.0~2.7 μm [图6(E)].

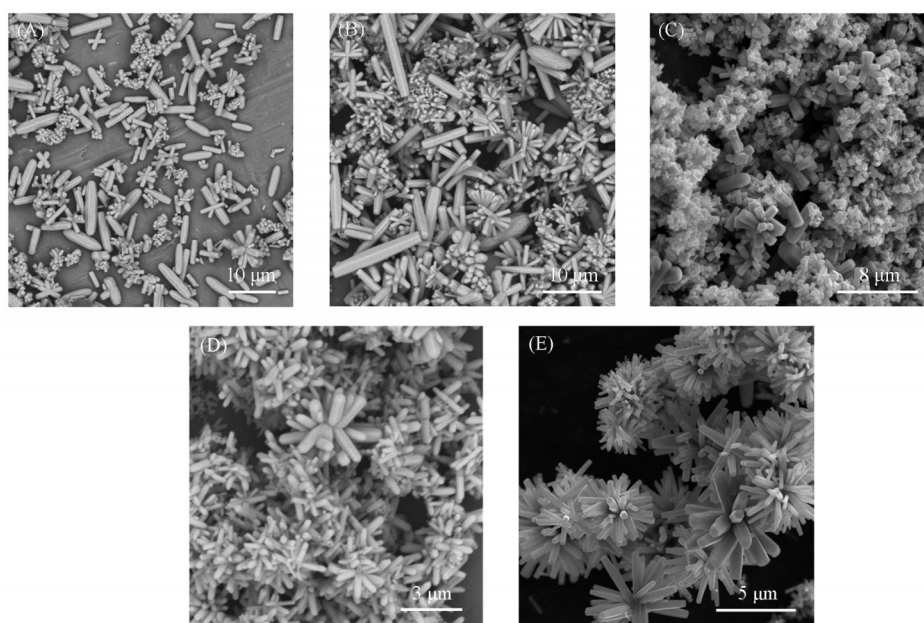


Fig. 6 SEM images of ZnO-RF synthesized with different concentration and reaction time

(A—C) 95 °C, 1 h+r. t., 1 h. (A) Solution A(2 mL)+solution B(1 mL)+H₂O(3 mL); (B) solution A(4 mL)+solution B(2 mL)+H₂O(3 mL); (C) solution A(6 mL)+solution B(3 mL)+H₂O(3 mL). (D, E) solution A(6 mL)+solution B(3 mL)+H₂O(3 mL). (D) 95 °C, 6 h;(E) 95 °C, 12 h.

采用与刻蚀pre-ZnO-R得到ZnO-T和ZnO-S类似的策略, 选择棒状簇pre-ZnO-RF作为合成管状氧化锌簇(ZnO-TF)和螺丝状氧化锌簇(ZnO-SF)的前驱体. 蚀刻过程对ZnO从棒状花簇向管状花簇转变的影响与从ZnO-R转变到ZnO-T的一致. 如图7(A)~(C)所示, 随着“50 °C-室温”蚀刻从1次增加到3次, 花簇的棒状氧化锌沿着c轴方向被逐步刻蚀, 最终形成中空管状簇且长径比未发现明显改变. 最后, 采用与合成螺丝状ZnO-S相同的刻蚀实验参数, 通过控制反应时间, 成功地将棒状簇ZnO-RF蚀刻成螺丝状簇. 而且随着蚀刻时间的延长, 氧化锌晶体的形貌会从棒状簇变为螺丝状簇, 最终变为杠铃状簇且杠铃杆的直径同样略有变细[图6(E), 图8(A)和(B)].

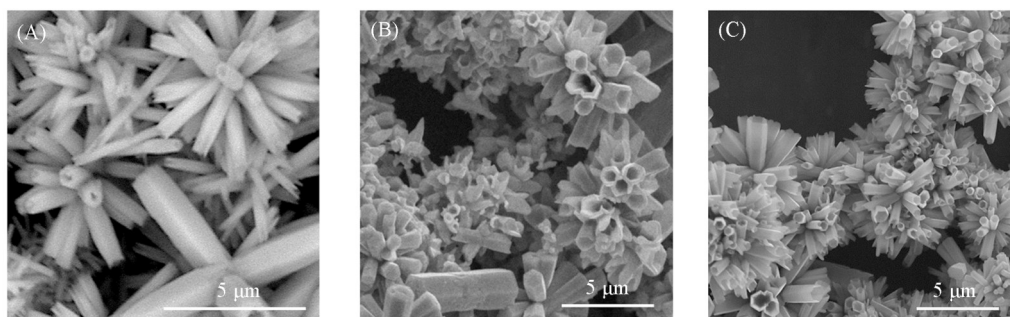


Fig. 7 SEM images of ZnO-TF with different etching cycles

Pre-ZnO-RF+reacted solution+“50 °C+r. t.” etching. (A) 1 cycle etching; (B) 2 cycles etching; (C) 3 cycles etching.

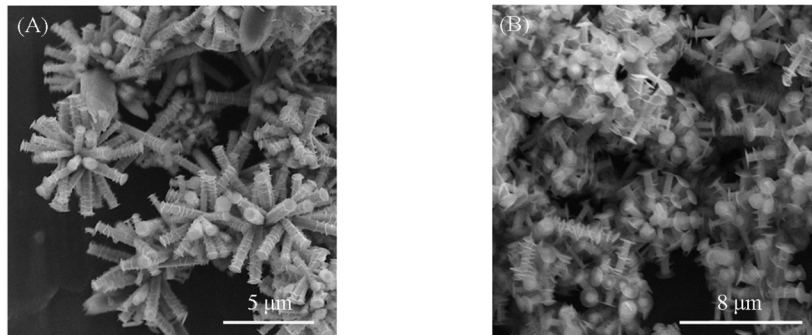


Fig. 8 SEM images of ZnO-SF under different etching period
Pre-ZnO-RF+reacted solution D. (A) 95 °C, 36 h+r. t. , 1 h; (B) 95 °C, 48 h.

2.3 不同形貌 ZnO 的光电化学性能

图9(A)为6种不同形貌ZnO的XRD谱图. 将合成样品的谱图与标准卡片(JCPDS 36-1451)进行比较, 结果表明合成的ZnO样品均为高纯的纤锌矿ZnO晶体, 且具有较高的晶体质量和结晶度. 在31.72°, 34.39°, 36.32°, 47.57°, 56.64°, 62.88°和67.96°处出现的特征衍射峰分别对应于氧化锌的(100), (002), (101), (102), (110), (103)和(112)晶面^[17,47]. 从图9(B)的紫外-可见吸收光谱可以看出, 尽管合成的6种ZnO样品形貌有显著差别, 但都在400 nm之前展现出明显的紫外吸收带, 而在400 nm以上的可见光谱中基本没有吸收. 这可以归因于ZnO为宽禁带半导体, 具有3.4 eV的带隙, 其主要吸收光波长在紫外光范围.

为了进一步研究ZnO的形貌差异对其电化学性能的影响, 分别测试了所合成的ZnO晶体的光电流响应[图10(A)], 从中可以看出, 管状氧化锌簇(ZnO-TF)的光电电流数值最高, 而螺丝状ZnO-S的光

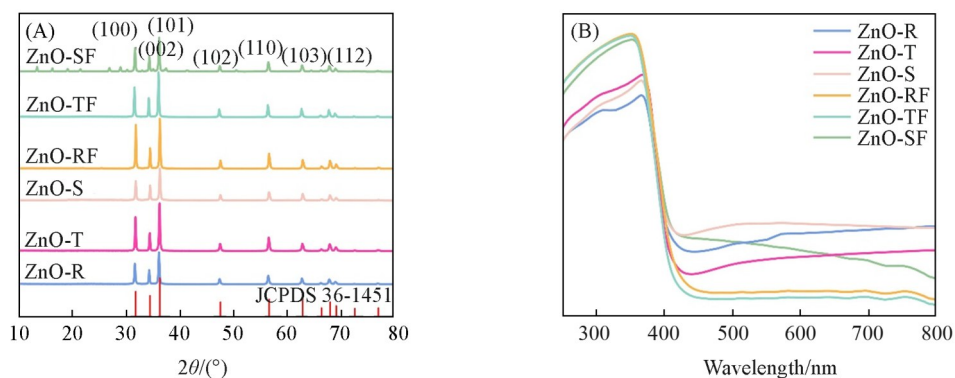


Fig. 9 XRD patterns(A) and UV-Vis diffuse reflectance spectra(B) of ZnO samples

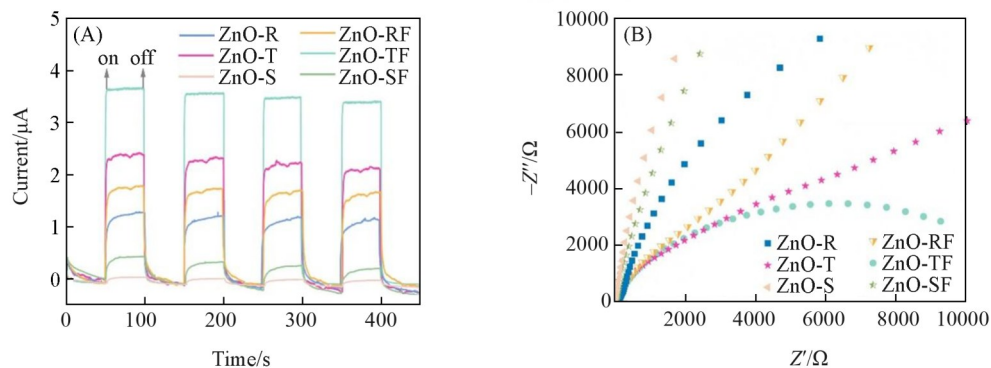


Fig. 10 Photocurrent responses(A) and ESI plots(B) of ZnO samples

电电流则最小. 这表明 ZnO 的形态特征对其光电化学性能有着至关重要的影响. 具体来说, 棒状中心蚀刻而产生的管状形貌大幅提高了光生载流子的迁移和分离的效率. 相反, 通过蚀刻形成的螺纹片状结构则会降低这种作用. 为了进一步研究电荷分离效率, 测试了 6 种 ZnO 晶体的电化学阻抗谱(EIS)进[图 10(B)]. 结果表明, ZnO-TF 和 ZnO-S 分别表现出最小和最大的奈奎斯特半径, 这表明它们的电荷转移效率存在差异, 并与光电流响应测试的结果相吻合. 此外, 簇状 ZnO(ZnO-RF, ZnO-TF 和 ZnO-SF)的光电性能分别优于分散形态的棒状 ZnO(ZnO-R)、管状 ZnO(ZnO-T)和螺丝状 ZnO(ZnO-S), 这也表明 ZnO 晶体的聚集形态促使彼此间产生了协同作用.

3 结 论

采用简便的“水热合成-水热活化蚀刻”策略合成了 6 种具有不同形貌的氧化锌微米晶体. 通过精准调控合成参数(时间、投料量和溶剂)和刻蚀参数(刻蚀液体系、轮次和时间), 实现了氧化锌微晶从棒状向聚集簇、中空管及螺丝棒等形貌的可控演变. 在合成出的棒状、棒状簇、管状、管状簇、螺丝状和螺丝状簇氧化锌晶体中, 管状簇形貌的 ZnO-TF 具有最高的紫外光区吸收与光电流响应及最小的阻抗值, 展现出优异的光电化学性能. 本文研究工作可为特定形貌氧化锌的控制合成提供参考.

参 考 文 献

- [1] Ansari A. A., Lv R., Gai S., Parchur A. K., Solanki P. R., Archana, Ansari Z. A., Dhayal M., Yang P., Nazeeruddin M. K., Tavakoli M. M., *Coord. Chem. Rev.*, **2024**, *515*, 215942
- [2] Zheng S. M., Li B., Yuan Z. H., Yang J. C. E., Zhang J., Zhong L. B., Zheng Y. M., *Sep. Purif. Technol.*, **2023**, *317*, 123830
- [3] Ren X., Xu Z., Liu D., Li Y., Zhang Z., Tang Z., *Sens. Actuators B: Chem.*, **2022**, *357*, 131384
- [4] Elias M., Alam R., Khatun S., Swapon Hossain M., Shaheen Shah S., Abdul Aziz M., Nizam Uddin M., Awlad Hossain M., *J. Ind. Eng. Chem.*, **2025**, *143*, 424—436
- [5] Zhou Y., Xu L., Wu J., Zhu W., He T., Yang H., Huang H., Cheng T., Liu Y., Kang Z., *Energy Environ. Sci.*, **2023**, *16*(8), 3526—3533
- [6] Wan Y., Li J., Ni J., Wang C., Ni C., Chen H., *J. Hazard. Mater.*, **2022**, *435*, 129073
- [7] Ghannam H., Silva J. P. B., Chahboun A., *RSC Adv.*, **2021**, *11*(38), 23346—23354
- [8] Chi W., Yu F., Dong G., Zhang W., Chai D.F., Han P., Zhao M., Li J., Zhang X., *Colloids Surf. A*, **2024**, *695*, 134291
- [9] Liu P. F., You S. W., Zhang Y. F., Tang J. W., Wang B. M., Liu Y., Hua Q. X., *Chem. J. Chinese Universities*, **2023**, *44*(8), 20220767(刘鹏飞, 游韶玮, 张亦飞, 汤建伟, 王保明, 刘咏, 化全县. 高等学校化学学报, **2023**, *44*(8), 20220767)
- [10] Xu H., Zhu S., Xia M., Wang F., Ju X., *J. Hazard. Mater.*, **2022**, *423*, 127192
- [11] Khan M. W. A., Shaalan N. M., Ahmed F., Sherwani S., Aljaafari A., Alsukaibi A. K. D., Alenezi K. M., Al-Motair K., *Chemosensors*, **2024**, *12*(2), 28
- [12] Chen H., Gong Y., Chu Q., Pang X., Huang X., Tian X., Yang W., Pan Q., Su Z., Wang X., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2023**, *39*(6), 954—959
- [13] Huang Y. T., Ying Z. P., Zheng J. X., Zhuang S. G., Liu L., Feng W., *Chem. J. Chinese Universities*, **2018**, *39*(9), 2031—2038(黄雨婷, 英祖萍, 郑继兴, 庄骊耕, 刘璐, 冯威. 高等学校化学学报, **2018**, *39*(9), 2031—2038)
- [14] Sun P., Lv Z., Sun C., *Nanomaterials*, **2024**, *14*(10), 844
- [15] Shao H. M., Shen X. Y., Li X. T., Cui Y., Zhang W., Xu W. D., Shao Z. C., Zhai Y. C., *Int. J. Min. Met. Mater.*, **2021**, *28*(4), 729—737
- [16] Ren G., Li Z., Yang W., Faheem M., Xing J., Zou X., Pan Q., Zhu G., Du Y., *Sens. Actuators B: Chem.*, **2019**, *284*, 421—427
- [17] Del Gobbo S., Poolwong J., D'Elia V., *Cryst. Growth Des.*, **2019**, *19*(11), 6792—6800
- [18] Wang F. X., Chen Z. Y., Yang W. T., Liu L. J., Ren G. J., Liu Y. F., Pan Q. H., *Chem. J. Chinese Universities*, **2019**, *40*(1), 24—29(王芙蓉, 陈子玉, 杨玮婷, 刘丽娟, 任国建, 刘艳凤, 潘勤鹤. 高等学校化学学报, **2019**, *40*(1), 24—29)
- [19] Miao X. J., Zhao X. J., Qin H., Jin Q., Chen Y., Cao Z. Q., Yang W. T., Wang Q. J., Pan Q. H., *Rare Met.*, **2022**, *41*(11), 3662—3670
- [20] Abdelaal H. M., Shaikjee A., Esmat M., *Ceram. Int.*, **2020**, *46*(12), 19815—19821
- [21] Lin D., Duan P., Yang W., Liu Y., Pan Q., *Inorg. Chem. Front.*, **2020**, *7*(8), 1643—1650
- [22] Li N., Wang W., Zhu L., Cui W., Chen X., Zhang B., Zhang Z., *Chem. Eng. J.*, **2021**, *421*, 127857
- [23] He Q., Li X., Zhang J., Zhang H., Briscoe J., *Nano Energy*, **2021**, *(85)*, 105938
- [24] Shen X., Shao H., Liu Y., Zhai Y., *J. Mater. Sci. Technol.*, **2020**, *51*, 1—7
- [25] He X., Yang C., Wang D., Gilliland Iii S. E., Chen D. R., Wang W. N., *CrystEngComm*, **2017**, *19*(18), 2445—2450

- [26] Chen Y. F., Liu F. S., Hu Z. L., Jian H. G., Wang Y. F., *Mater. Res. Innovations*, **2012**, 16(5), 372—376
- [27] Wilson H. F., Tang C., Barnard A. S., *J. Phys. Chem. C*, **2016**, 120(17), 9498—9505
- [28] Liu L. K., Shi C., Wang G. Q., Wang Y., Sun L., *Surf. Coat. Technol.*, **2017**, 331, 85—89
- [29] Yu Q., Lin R., Jiang L., Wan J., Chen C., *Sci. China Mater.*, **2018**, 61(7), 1007—1011
- [30] Lee S., Walter T. N., Noh S., Mohny S. E., Jackson T. N., *J. Microelectromech. S.*, **2020**, 29(6), 1504—1509
- [31] Wang Y., Wu T., Chen M., Su L., Zhang Q., Yuan L., Zhu Y., Tang Z., *Appl. Surf. Sci.*, **2014**, 292, 34—38
- [32] Luo Q. P., Lei B. X., Yu X. Y., Kuang D. B., Su C. Y., *J. Mater. Chem.*, **2011**, 21(24), 8709—8714
- [33] Wang H., Li M., Jia L., Li L., Wang G., Zhang Y., Li G., *Nanoscale Res. Lett.*, **2010**, 5(7), 1102
- [34] Yan F., Huang L., Zheng J., Huang J., Lin Z., Huang F., Wei M., *Langmuir*, **2010**, 26(10), 7153—7156
- [35] Yang A. G., Qu X. P., *Opt. Mater.*, **2018**, 84, 404—408
- [36] Liu B., Zeng H. C., *J. Am. Chem. Soc.*, **2003**, 125(15), 4430—4431
- [37] Zhou F., Jing W., Shi J., Jiang Z., Cheng Y., Gao K., *Ceram. Int.*, **2016**, 42(4), 4788—4796
- [38] Raha S., Ahmaruzzaman M., *Nanoscale Adv.*, **2022**, 4(8), 1868—1925
- [39] Zhang S., Yan C., Zhang H., Lu G., *Mater. Lett.*, **2015**, 148, 1—4
- [40] Hu X. Y., Liu Q. G., Zhuo K. L., Wang J. J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2013**, 34(2), 324—330(胡晓宇, 刘千阁, 卓克垒, 王键吉. 高等学校化学学报, **2013**, 34(2), 324—330)
- [41] Wang L., Wei Y., Chen C., Yang S., *Dalton Trans.*, **2021**, 50(8), 3011—3019
- [42] Fan H. F., Guo Z. G., *New J. Chem.*, **2020**, 44(36), 15483—15491
- [43] Luo S., Liu J., Wu Z., *J. Phys. Chem. C*, **2019**, 123(18), 11772—11780
- [44] Zhang P., Xu F., Navrotsky A., Lee J. S., Kim S., Liu J., *Chem. Mater.*, **2007**, 19(23), 5687—5693
- [45] Zheng H. B., Wu D., Wang Y. L., Liu X. P., Gao P. Z., Liu W., Wen J., Rebrov E. V., *J. Alloys Compd.*, **2020**, 838, 155219
- [46] Chen Z., Gao L., *Cryst. Growth Des.*, **2008**, 8(2), 460—464
- [47] Zhao P., Zhang J. T., Lin Y. H., *Chem. J. Chinese Universities*, **2020**, 41(3), 538—547(赵鹏, 张晋腾, 林艳红. 高等学校化学学报, **2020**, 41(3), 538—547)

(Ed.: H, K, M)