

燃烧合成法制备的 Er-ZnO 纳米颗粒 及其光催化性能研究

戚 丽 方 洋 颜冬仙 杨 娜 张来军 邹如意*

(上饶师范学院化学与环境科学学院,江西省塑料制备成型重点实验室,上饶 334001)

摘 要 以硝酸锌为锌源,柠檬酸为燃烧剂,采用燃烧合成法制备了掺杂铒(Er)的纳米氧化锌(ZnO)(Er-ZnO),并对样品进行了测试。考察了不同 Er-ZnO 在紫外光照条件下催化降解罗丹明 B 的效率。结果表明:制得的 ZnO 为六边纤锌矿,粒径为 50~300nm 的多面体颗粒,并组合成多孔块体,Er 用量为 0.8%(wt,质量分数)的 Er-ZnO 经 700℃ 煅烧 3h 后的光催化效果最佳,在 Er-ZnO 用量为 0.5g,紫外光照 3h,120mL 罗丹明 B 浓度为 0.02g/L,溶液 pH=9 条件下,对罗丹明 B 的降解率达到 92.4%。

关键词 燃烧合成法,氧化锌,铒,掺杂,罗丹明 B,光催化,降解率

Preparation of Er-ZnO nanoparticles by combustion synthesis and its photocatalytic property

Qi Li Fang Yang Yan Dongxian Yang Na Zhang Laijun Zou Ruyi

(College of Chemistry and Environmental Science, Jiangxi Province Key Laboratory of Polymer Preparation and Processing, Shangrao Normal University, Shangrao 334001)

Abstract Er-doped ZnO nanoparticles (Er-ZnO) were synthesized using zinc nitrate as zinc source and citric acid as combustion agent via combustion synthesis method, and were tested. The photocatalytic activity of different Er-ZnO toward the degradation of Rhodamine B were studied under ultraviolet light. The results showed that ZnO possessed hexagonal wurtzite structure, presented polyhedral particle with size of 50~300nm, which combined into porous blocks. The 0.8% (wt, mass fraction) Er-doped ZnO calcinated at 700℃ for 3h exhibited the highest photocatalytic ability, and the degradation rate of 0.5g sample to rhodamine B solution (0.02g/L, pH=9) reached 92.4% under UV irradiation for 3h.

Key words combustion synthesis, zinc oxide, Er, doping, rhodamine B, photocatalysis, degradation rate

氧化锌(ZnO)独特的光学和电学特性,在纳米激光器、压电纳米发电机、太阳能电池和气体传感器等领域^[1]饱受欢迎。同时 ZnO 具有光敏性、无毒性、宽禁带等多种特性,高度符合水净化技术对催化剂的要求。而且,为了适应更高要求的环境水净化,许多科研工作者正潜心研究开发具有更高活性的 ZnO 光催化剂。

半导体晶体内掺杂异质,在半导体的禁带中引入杂质能级,可低价带电子跃迁的激发能,还能阻碍电子-空穴复合,延长载流子寿命,从而影响半导体在光学、电学等多方面的性能,这是简便易行的半导

体改性方法,Manikandan 等^[2]研究自制的镧(La)掺杂纳米 ZnO 颗粒时发现 La 对 ZnO 纳米颗粒的尺寸、带隙和光致发光性能有重要的调节作用,并指出掺 La 的纳米 ZnO 光致发光光谱的红移现象。Kennedy 等^[3]发现 ZnO 薄膜中掺入 2%(wt,质量分数,下同)的铝(Al),使 ZnO 净增 498Ω/cm 的电导率。戚丽等^[4-5]则证明了纳米 ZnO 晶体中的异质铈(Nd)或铒(Er)能提高 ZnO 的光催化活性。此外,不仅异质可以改变 ZnO 等半导体的性能,形貌上的差异也是影响其性能的重要因素,Kajbafvala 等^[6]比较了纳米球状 ZnO、纳米花形 ZnO 和普通块

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21561028);江西省塑料制备成型重点实验室开放课题(jxsr201602、jxsr201704);上饶师范学院校级课题(201601、201502);上饶师范学院大学生科技课题(2016dxs30)

作者简介:戚丽(1982-),女,硕士,主要从事功能材料的合成及其应用研究。

联系人:邹如意(1972-),男,副教授,主要从事功能材料及电化学研究。

状 ZnO 三者波长为 253.7nm 的紫外光照条件下催化降解亚甲基蓝的效果,发现纳米球状 ZnO 催化效率最高,其次是纳米花形 ZnO,普通块状 ZnO 最低,认为光催化反应主要发生于催化剂的表面,多孔或表面褶皱的 ZnO 晶粒拥有超大的比表面,能承载更多的反应活性位点,反应得以量增;结构上的缺陷可赋予 ZnO 晶体更多的电子捕获阱,能阻碍光生电子与空穴的复合,吸附于 ZnO 颗粒表面的电子供体被空穴氧化生成氧化性自由基进而氧化其他有机物,这与杂质缺陷相似;纳米尺寸 ZnO 颗粒受尺寸效应影响,禁带宽度也小于大体积 ZnO 的禁带宽度,有利于价带电子向导带迁移,即纳米尺寸的 ZnO 颗粒更容易被激发出光生电子-空穴对^[6]。为获得形貌各异的 ZnO 晶粒,可选择不同的制备方法控制其形貌,如乔梅英等^[7-8]分别采用溶胶-凝胶法和水热合成法各自合成了球状和鱼鳞片状的纳米 ZnO,其光催化降解效率各有不同。

ZnO 晶粒中的异质及其形貌在一定程度上都可以影响其光催化活性。基于此,为获得理想的光催化剂,本研究以 Er 为掺杂异质,采用燃烧合成法制备了形貌特异的 Er 掺杂纳米 ZnO(Er-ZnO),并对 Er-ZnO 的结构形貌和光学性能进行了研究,最后考察了 Er-ZnO 的光催化降解罗丹明 B 的效率。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

六水合硝酸锌 $[\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$,分析纯,广州化学试剂厂;柠檬酸铵 $[(\text{NH}_4)_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7]$,分析纯、三氧化二铒(Er_2O_3 ,分析纯)、硝酸(65.0%~68.0%)、硫酸(H_2SO_4 ,98%)、氢氧化钠(NaOH ,分析纯),国药集团化学试剂上海公司;罗丹明 B(分析纯),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;二次蒸馏水,实验室自制。

数显恒温磁力搅拌器(85-2 型),江苏省金坛市友联仪器研究所;真空干燥箱(DZF-6210 型),上海一恒科学仪器有限公司;马弗炉(GZ1.5-10TB 型),上海高致精密仪器有限公司;X-射线衍射仪(XRD,XRD-6100 型),日本岛津公司;傅里叶红外光谱仪(FT-IR,NICOLET 6700 型),美国赛默飞世尔公司;紫外-可见分光光度计(UV-Vis,Cary 60 型),美国安捷伦科技公司。冷场发射扫描电子显微镜电镜(FESEM,JSM-6701F 型),日本电子株式会社;电子天平(ME204 型),深圳市德优平科技有限公司;低速台式离心机(TDL-80-2B 型),上海安亭科学仪器

厂;紫外灯(ZW10S15W-Z331 型),沈阳普力德商贸有限公司。

1.2 样品的制备

称取 0.21g Er_2O_3 ,用稍过量的硝酸溶液(0.1mol/L)溶解,用蒸馏水定容为 10mL 溶液,待用;称取 20g $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和略过量 $(\text{NH}_4)_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 混合并溶解成约 150mL 的混合液,采用数显恒温磁力搅拌器(85-2 型,江苏省金坛市友联仪器研究所)充分搅拌 30min,分别称取 0mL、0.15mL、0.3mL、0.6mL、2.4mL、4.2mL 的上述硝酸溶解的 Er_2O_3 溶液加入到混合溶液中,加热搅拌,蒸去水分后,采用真空干燥箱(DZF-6210 型,上海一恒科学仪器有限公司)120℃烘干,得到前驱体,最后采用马弗炉(GZ1.5-10TB 型,上海高致精密仪器有限公司)煅烧,即可得到 Er 的用量分别为 0.05% (wt,质量分数,下同)、0.1%、0.2%、0.8%、1.4%、0% 的系列掺杂铒(Er)的纳米氧化锌($\text{ZnO}(\text{Er-ZnO})$),为考察煅烧温度和时间对 Er-ZnO 光催化活性的影响,各样品制备程序中设置的煅烧时间分别为:2h、3h、4h、5h;煅烧温度分别设置:400℃、500℃、600℃、700℃。所有样品统一记作 $\text{Er}(x)\text{-ZnO}(y-z)$,其中 x 为 0、0.05、0.1、0.2、0.8、1.4,代表 Er 的用量(wt,质量分数,下同); y 为 2、3、4、5,代表煅烧时间(h); z 为 400、500、600、700,代表煅烧温度(℃)。

1.3 样品的测试

采用 X-射线衍射仪(XRD,XRD-6100 型,日本岛津公司)分析样品的晶体结构。采用傅里叶红外光谱仪(FT-IR,NICOLET 6700 型,美国赛默飞世尔公司)分析样品的结构。采用紫外-可见分光光度计(UV-Vis,Cary 60 型,美国安捷伦科技公司)分析样品的光吸收性能。采用冷场发射扫描电子显微镜电镜(FESEM,JSM-6701F 型,日本电子株式会社)观察样品的形貌。

光催化性能测试。称取浓度为 0.02g/L 的罗丹明 B 溶液 120mL,分别加入 0.5g 不同的 Er-ZnO 光催化剂,采用紫外灯(ZW10S15W-Z331 型,沈阳普力德商贸有限公司)辐照,室温条件下光照反应 3h。期间每隔 30min 取 1mL 样液,用于检测罗丹明 B 浓度,以考察各 Er-ZnO 在不同 pH 条件下的催化效率。反应溶液的 pH 用 H_2SO_4 和 NaOH 溶液调节。

Er-ZnO 光催化剂对罗丹明 B 样液的光降解率计算见式(1)。

$$\eta = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, η 为光降解率, %; A_0 和 A_t 分别为反应前和反应后罗丹明 B 的吸光度。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

Er(0.8)-ZnO(3-700) 的 XRD 谱图见图 1。从图 1 可以看出, 在 Er 用量为 0.8%, 煅烧时间为 3h, 煅烧温度为 700℃ 条件下, 制得的 Er(0.8)-ZnO(700) 的晶体特征表现为六边纤锌矿(JCPDS No. 36—1451), 晶胞参数 $a = 0.5206\text{nm}$, $c = 0.3249\text{nm}$, 谱线上尖锐的衍射峰说明该样品的结晶度好, 样品中与 Er 的相关衍射峰没有在谱线上反映出来, 是因为仪器的灵敏度尚不足以对样品中极少量的 Er 产生响应。

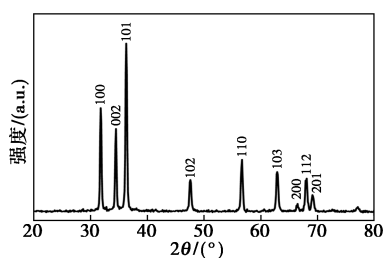


图 1 Er(0.8)-ZnO(3-700) 的 XRD 谱图

2.2 FT-IR 分析

Er(0.8)-ZnO(3-700) 样品(a)及其前驱体(b)的 FT-IR 谱图见图 2。从图可以看出, 2 中曲线(a)和(b)分别是 Er(0.8)-ZnO(3-700) 样品曲线[见谱线(a)]的 443cm^{-1} 和 493cm^{-1} 两相邻峰为 Zn—O 键的特征振动峰, 这结果与参考文献[9]相同; 谱线(b)显示了前驱体中各结构官能团的特征红外吸收峰, 3390cm^{-1} 为 O—H 键伸缩振动, 2928cm^{-1} 和 2849cm^{-1} 为亚甲基中 C—H 键的伸缩振动, 1650cm^{-1} 和 1380cm^{-1} 两处分别对应羧酸盐的 —COO^- 阴离子中两碳氧键($[\text{O}=\text{C}=\text{O}]^-$)的不对称和对称伸缩振动峰, 1048cm^{-1} 为醇结构中 C—O 的伸缩振动峰, 669cm^{-1} 为 Zn—O 的伸缩振动吸收峰, 谱线(b)上各吸收峰的归属与参考文献[10]中对柠檬酸锌红外光谱的描述相近。综合以上说明, 所制备的产品为氧化锌, 其前驱体的主体成份为柠檬酸锌。另外, 曲线(a)和曲线(b)上波数为 2360cm^{-1} 的峰缘于空气中的 CO_2 的不对称伸缩振动, 且两红外谱线上都没有与 Er 的相关振动峰, 是因为两样品中 Er 的含量太少, 不能引起足够强度的

红外响应。

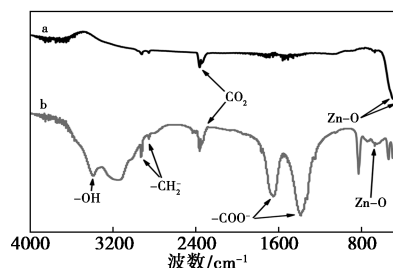


图 2 Er(0.8)-ZnO(3-700) 样品(a)及其前驱体(b)的 FT-IR 谱图

2.3 UV-Vis 分析

样品的 UV-Vis 谱图见图 3。从图可以看出, Er(0)-ZnO(3-700) (见谱线 a)、Er(0.05)-ZnO(3-700) (见谱线 b) 和 Er(0.8)-ZnO(3-700) (见谱线 c) 在 $200 \sim 376\text{nm}$ 范围内的光吸收率都达到 98.5% 左右, 3 条光吸收曲线在该区域几乎重合为同一水平线, 说明 3 种 Er-ZnO 在紫外区都有相同的光吸收率, 而在 $400 \sim 800\text{nm}$ 范围内, 三者的光吸收率则各有差异; Er(0.8)-ZnO(3-700) 在整个可见-近红外光区的光吸收率都很高, 其次是 Er(0.05)-ZnO(3-700), Er(0)-ZnO(3-700) 在该区段的光吸收率最低, 几乎是接近 7% 的水平线, 可见 Er 掺入氧化锌晶体内部可以拓展氧化锌对光辐照的可利用范围; 同时, 谱线 c 还显示在 522nm 和 654nm 处有 2 个强的吸收峰, 表明 Er(0.8)-ZnO(3-700) 对这 2 个波长的辐射有更高的量子效率, 预示它有更高的光催化效率。

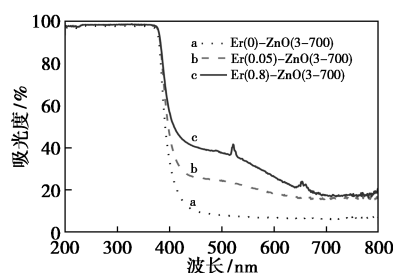


图 3 样品的 UV-Vis 谱图

2.4 FESEM 分析

Er(0.8)-ZnO(3-700) 及其前驱体的 FESEM 图见图 4。从图 4(a) 可以看出, 前驱体柠檬酸锌晶粒的形貌基本呈大小不一的方块形状。从图 4(b) 可以看出, Er(0.8)-ZnO(3-700) 的宏观形貌保持着前驱体晶体的方块状构架, 且多孔, 这是由于前驱体内的有机成分氧化气化和气体逸散时为 ZnO 晶块制造了大量孔隙, 有利于 ZnO 块体的孔隙率和比表面积增加。微观上此 ZnO 块体是具有六边形晶面的

多面体颗粒组成[见图 4(b)的插图部分所示],该多面体颗粒粒径分布较宽(50~300nm)。

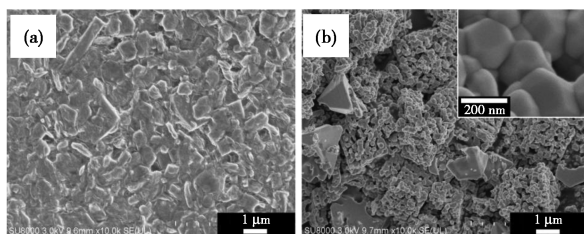


图 4 Er(0.8)-ZnO(3-700)及其前驱体的 FESEM 图
[(a)柠檬酸锌;(b)Er(0.8)-ZnO(3-700)]

2.5 光催化的影响因素分析

影响光催化剂效率的因素很多,不仅有反应体系 pH 的因素,制备时的煅烧温度和时间也是重要因素,而且催化剂中 Er 的用量对其光催化活性也有很大程度的影响。

2.5.1 煅烧温度分析

在 Er 用量为 0.8%, pH=9, 煅烧时间为 3h, 紫外光照反应 3h 条件下, 煅烧温度对 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化降解率的影响见图 5。从图可以看出, 在 Er 用量为 0.8%, pH=9, 煅烧时间为 3h, 紫外光照反应 3h 条件下, 随着煅烧温度的提高, Er-ZnO 对罗丹明 B 的光催化降解率呈快速上升态势, 在煅烧 3h, 煅烧温度为 700℃ 条件下, 制得的 Er(0.8)-ZnO(3-700)对罗丹明 B 的光催化降解率最高达到 92.4%, 煅烧温度越高催化能力越强。这是因晶体烧结程度和被包埋在晶体内的硝酸根、柠檬酸根以及氢根离子等物种的热分解残余物共同影响的结果: 随着煅烧温度升高, ZnO 结晶度提高, 光降解效率提高^[11], 同时热分解残余物在更高的煅烧温度下进一步被分解、气化并逸出形成更多的孔隙, 增大了 ZnO 颗粒的比表面积, 可提升 ZnO 的催化活性; 煅烧温度继续提高, 在煅烧温度 > 600℃ 至 700℃ 阶段, 热分解残余物渐趋于除尽, 对 ZnO 催化活性的影响逐渐减小, 而高温烧结使 ZnO 的粒径增大, 孔隙率降低致使有效活性表面减小, 反而导致光催化活性下降^[12], 对罗丹明 B 的光催化降解率呈缓

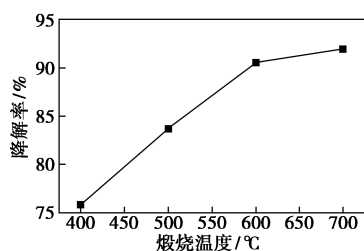


图 5 煅烧温度对 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化降解率的影响

慢上升态势, 催化效率提升变慢。

2.5.2 煅烧时间分析

在 Er 用量为 0.8%, pH=9, 煅烧温度为 700℃, 紫外光照反应 3h 条件下, 煅烧时间对 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化降解率的影响见图 6。从图可以看出, 在 Er 用量为 0.8%, pH=9, 煅烧温度为 700℃, 紫外光照反应 3h 条件下, 随着煅烧时间的增加, Er-ZnO 对罗丹明 B 的光催化降解率呈快速增长又下降态势, 在煅烧时间为 3h 条件下, 制得的 Er(0.8)-ZnO(3-700)对罗丹明 B 的光催化降解率最高达到 92.4%, 煅烧时间 > 3h 后其降解效率呈下降态势, 在煅烧时间为 3h 内, 煅烧时间越久, 样品的催化效率随之提高, 3h 后其降解效率下降。该现象也缘于 ZnO 晶体内热解残余物和晶体被烧结程度对 Er-ZnO 催化活性的共同影响: 在确定的煅烧温度条件下, 煅烧时间越长, Er-ZnO 结晶度越高, 残余物越少, 孔隙丰富, 催化活性增强, 而更长时间的煅烧(煅烧时间 > 3h 后), Er-ZnO 内孔隙收缩(甚至有介孔和微孔消失), 有效比表面减少而导致催化活性降低。

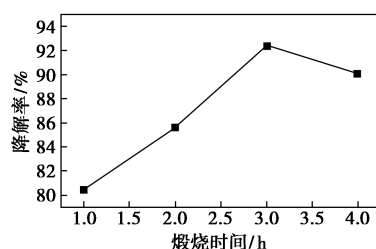


图 6 煅烧时间对 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化降解率的影响

2.5.3 Er 用量分析

在 pH=9, 煅烧时间为 3h, 煅烧温度为 700℃, 紫外光照反应 3h 条件下, Er 用量对 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化降解率的影响见图 7。从图可以看出, 在 pH=9, 煅烧时间为 3h, 煅烧温度为 700℃, 紫外光照反应 3h 条件下, 随着 Er 用量的增加, Er(0.8)-ZnO(3-700)对罗丹明 B 的光催化降解率呈快速增长又快速下降态势, 在 Er 用量为 0.8% 条件下, Er(0.8)-ZnO(3-700)对罗丹明 B 的光催化降解率最高达到 92.4%, 在 Er 用量 > 0.8% 条件下, 光催化降解率呈下降态势, ZnO 是通过光辐射激发电子跃迁形成的空穴-电子对进一步催生 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 等自由基来表现光催化活性的, ZnO 接纳的光量子越多, 被激发的载流子浓度越大, 因为 Er 掺入 ZnO 能扩大它的光吸收范围, 因此提高激发载流子的能

力。少量稀土离子掺杂促使晶体结构畸变提高了光生电子-空穴分离,且晶体内部产生离子缺陷,可以成为载流子的捕获阱,延长其寿命,有利于提光催化活性^[13]。然而在 Er 用量超过 0.8% 条件下,异质掺杂造成的过于密集缺陷点则大量捕获的光生载流子并促成它们重新的复合,因此降低了电子或空穴浓度,进而降低了 ZnO 催生氧化性自由基的能力^[14],随之对罗丹明 B 的降解效率下降。

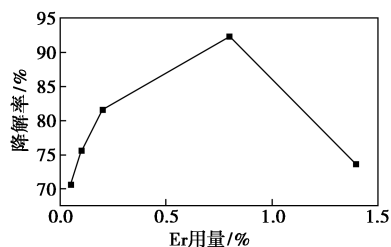


图 7 Er 用量对 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化降解率的影响

2.5.4 溶液 pH 分析

在 Er 用量为 0.8%, 煅烧时间为 3h, 煅烧温度为 700℃, 紫外光照反应 3h 条件下, pH 对 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化降解率的影响见图 8。从图可以看出,在 Er 用量为 0.8%, 煅烧时间为 3h, 煅烧温度为 700℃, 紫外光照反应 3h 条件下, Er(0.8)-ZnO(3-700)在酸性条件下催化降解罗丹明 B 的效率比较低,而在碱性条件下降解率较高,在罗丹明 B 溶液的 pH=9 条件下, Er(0.8)-ZnO(3-700)对罗丹明 B 的降解率最高达到 92.4%。这是因为 ZnO 的零电点约在 9 附近。在 pH>9 条件下, OH⁻ 累积附着于催化剂表面,使之成负电性,并与罗丹明 B 产生静电排斥,这不利于·OH 与罗丹明 B 反应;而 pH<9 条件下, ZnO 被罗丹明 B 包覆,阻碍了光对催化剂的辐照,·OH 产率下降,导致降解效率下降;因此在 pH=9 条件下,光催生·OH 的效率最高,故而对罗丹明 B 的降解率高。

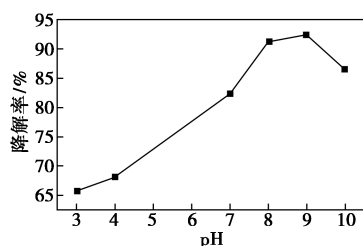


图 8 pH 对 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化降解率的影响

3 结论

制备了 Er 掺杂 ZnO 多面体晶粒,其粒径 50~

300nm,并聚集成具有多孔结构多级结构体,为六角纤锌矿型。在 Er 用量为 0.8%,煅烧时间为 3h,煅烧温度为 700℃ 制得的 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化剂具有最佳的光催化性能,在 Er(0.8)-ZnO(3-700)光催化剂用量为 0.5g,紫外光照反应 3h,对 120mL 罗丹明 B 浓度为 0.02g/L 溶液 pH=9 条件下,对罗丹明 B 的降解率达到 92.4%,具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] Phuruangrat A, Kongpet W, Yayapao O, et al. Ultrasonic-assisted synthesis, characterization, and optical properties of Sb doped ZnO and their photocatalytic activities[J]. Journal of Nanomaterials, 2014, 2014(8): 1-10.
- [2] Manikandan A, Manikandan E, Meenatchi B, et al. Rare earth element (REE) lanthanum doped zinc oxide (La:ZnO) nanomaterials: synthesis structural optical and antibacterial studies [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 723: 1155-1161.
- [3] Kennedy J, Murmu P P, Leveneur J, et al. Enhanced power factor and increased conductivity of aluminum doped zinc oxide thin films for thermoelectric applications[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2018, 18(2): 1384-1387.
- [4] 戚丽,俞杭丽,吴世军,等. Nd 掺杂 ZnO 纳米棒的制备及其光催化性能的研究[J]. 上饶师范学院学报, 2015, 35(6): 52-56.
- [5] 戚丽,郭大政,邹如意,等. Er 掺杂纳米 ZnO 的制备及紫外光催化降解罗丹明 B[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(8): 13-17.
- [6] Kajbafvala A, Ghorbani H, Paravar A, et al. Effects of morphology on photocatalytic performance of zinc oxide nanostructures synthesized by rapid microwave irradiation methods[J]. Superlattices and Microstructures, 2012, 51(4): 512-522.
- [7] 乔梅英,谷永庆.溶胶-凝胶法制备纳米氧化锌及其光催化性能[J]. 光谱实验室, 2012, 29(2): 1238-1240.
- [8] 韩帅,王海芳,侯彬,等. 水热合成法制备光催化剂氧化锌及光催化降解效果研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(1): 173-175, 181.
- [9] 魏素凤. 氧化锌薄膜与纳米棒的制备及其光学性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [10] 蒋金芝,唐有根,彭小刚. 柠檬酸锌的合成与结构分析[J]. 化学反应工程与工艺, 1997, 13(1): 73-77.
- [11] 陈姗姗. 纳米氧化锌复合粉体的制备及其光催化性能的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.
- [12] 徐松梅. 双元素掺杂 TiO₂ 粉体及薄膜的光催化及抗菌性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [13] 余长林,杨凯,余济美,等. 稀土 Ce 掺杂对 ZnO 结构和光催化性能的影响[J]. 物理化学学报, 2011, 27(2): 505-512.
- [14] Anandan S, Vinu A, Lovely K L P S, et al. Photocatalytic activity of La-doped ZnO for the degradation of monocrotophos in aqueous suspension[J]. Journal of Molecular Catalysis A (Chemical), 2007, 266(1/2): 149-157.

收稿日期: 2018-06-21

修稿日期: 2019-09-07