

# 镉掺杂氧化锌纳米花的制备及其光催化活性

翟英娇, 李金华\*, 陈新影, 宋星慧, 任航, 方铨,  
方芳, 楚学影, 魏志鹏, 王晓华

(长春理工大学理学院 国际纳米光子学与生物光子学联合研究中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:**以氯化锌、氯化镉、氢氧化钠为原料,采用水热法合成 Cd 掺杂纳米花状 ZnO 光催化剂,并通过该样品对罗丹明 B 水溶液的降解来研究其光催化活性。利用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线能量色散谱(EDS)、光致发光谱(PL)及紫外-可见分光光度计(UV-Vis)等测试手段对材料物性进行表征。实验结果表明:当掺杂  $\text{Cd}^{2+}$  时,样品形貌发生变化、粒径减小;掺杂  $\text{Cd}^{2+}$  后的 ZnO 的吸收边和紫外峰对比于纯 ZnO 均发生红移,禁带宽度由 3.24 eV 减小到 3.16 eV。通过光催化实验分析可知,掺杂后纳米 ZnO 光催化剂对罗丹明 B 水溶液的降解率有所提高,光照 3 h 其降解率高达 98%,说明与纯 ZnO 相比,Cd 掺杂 ZnO 纳米花具有更高的光催化活性。

**关键词:**氧化锌;Cd 掺杂;光催化

**中图分类号:**TB383 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20140701.0124

## Synthesis and characterization of Cd-doped ZnO nanoflowers and its photocatalytic activity

ZHAI Ying-jiao, LI Jin-hua\*, CHEN Xin-ying, SONG Xing-hui, REN Hang,  
FANG Xuan, FANG Fang, CHU Xue-ying, WEI Zhi-peng, WANG Xiao-hua

(*International Joint Research Center for Nanophotonics and Biophotonics, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: Jhli\_cust@163.com*

**Abstract:** The flower-like Cd-doped ZnO nanostructures were synthesized by hydrothermal method using zinc chloride ( $\text{ZnCl}_2$ ), cadmium chloride ( $\text{CdCl}_2$ ), sodium hydroxide ( $\text{NaOH}$ ) as reactants. Then, the photocatalytic activities of as-grown samples were investigated by photo-degradation of rhodamine B (RhB). The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive

收稿日期:2013-10-21;修订日期:2013-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61006065, No. 61076039, No. 61204065, No. 61205193, No. 10804071);高功率半导体激光国家重点实验室基金资助项目(No. 9140C310101120C031115);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 21022216110002, No. 20102216110001, No. 20112216120005);吉林省自然科学基金资助项目(No. 20101546, No. 20100111);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20090139, No. 20090555, No. 20121816, No. 201201116);吉林省教育厅资助项目(No. 2011JYT05, No. 2011JYT10, No. 2011JYT11);长春市国际科技合作计划资助项目(No. 2010CC02);吉林农业大学科研启动基金资助项目(No. 201238)

X-ray analysis(EDS), photoluminescence(PL) spectroscopy, UV-visible spectroscopy. Experimental results show that with the Cd doping, the morphologies of ZnO changed greatly, and the size of ZnO became smaller. In addition, compared with the undoped ZnO, the absorption edge and the UV emission peak of the Cd-doped ZnO nanoflowers made a red shift clearly. The band gap decreased from 3.24 eV to 3.16 eV. Finally, in the photocatalytic experiment, the photocatalytic activity of Cd-doped ZnO was enhanced, and the degradation of rhodamine B(RhB) was up to 98% after the irradiation for 3 h. So the photocatalytic activities of Cd-doped ZnO nanoflowers were higher than that of the undoped ZnO.

**Key words:** ZnO;Cd-doped;photocatalytic

## 1 引言

随着社会的发展与进步,环境危机和能源浪费已日益严重,因此探究其解决机理和寻求新的能源已成为目前众多科学前沿工作者较为关注的重要问题之一,而纳米半导体光催化剂恰好为解决这一问题提供了帮助<sup>[1]</sup>。目前常见的半导体光催化剂有 ZnO、CdS、TiO<sub>2</sub> 和 SnO<sub>2</sub> 等<sup>[2-3]</sup>,其中 ZnO 是一种新型的多功能半导体材料,具有发光性、压电性、导电性、气敏性、光催化性等诸多优越性能,主要应用在激光器、传感器、太阳能电池、紫外光探测器、发光二极管、光催化等方面。ZnO 材料来源广泛,价格低廉,无毒无害,制备方法多样,具有较高的化学稳定性、优越的光催化性能以及对太阳能的可直接利用性等特点而备受关注<sup>[4-6]</sup>。然而纳米 ZnO 光催化剂禁带宽度较宽(3.37 eV),仅能被波长较短的紫外光( $\lambda < 368.0$  nm)激发,为直接带隙半导体材料,所以对紫外光有较为强烈的吸收而对太阳能的利用率比较低。同时,紫外光激发的光生电子与空穴复合的时间较短,导致纳米 ZnO 量子效率也比较低<sup>[7-11]</sup>。针对上述问题,已采用多种办法进行改良,例如表面光敏化,贵金属沉积,金属离子、稀土元素、非金属元素的掺杂以及多种元素共掺杂等<sup>[12-13]</sup>。根据文献报道可知,光催化反应由一系列复杂的表面化学物理过程构成,所以有诸多因素影响半导体光催化反应的活性,其中既有自身因素,也有反应体系因素,例如催化剂结构、外加组分、外场效应、载体效应,其中外加组分对催化剂性能的影响包括表面吸附性能和电子-空穴对的分离效率,而金

属离子的掺杂是抑制电子-空穴对分离效率的重要手段之一<sup>[1,14]</sup>;在 ZnO 中掺杂微量 Cd<sup>2+</sup>,ZnO 的带隙中加入杂质能级,使其成为光生电子-空穴对的浅势捕获阱,激发光波长的选择范围拓宽,电子与空穴的复合时间也延长,从而提高了光催化活性<sup>[15-18]</sup>。除此之外,金属离子的光吸收范围比较宽,所以掺杂后的 ZnO 光谱响应范围可以延长至可见光区域,进而更充分地利用太阳能<sup>[19]</sup>。

本文以氯化锌、氢氧化钠及氯化镉为原料,采用水热法合成 Cd 掺杂纳米花状 ZnO 光催化剂,利用 XRD、SEM、PL 以及 UV-Vis 等测试手段对样品的物性进行表征,并通过降解罗丹明 B 水溶液研究其光催化性能。

## 2 实验

### 2.1 样品制备

金属掺杂的制备方法有很多,如溶胶-凝胶法、共沉淀-胶溶法、磁控溅射法、水热法等。由于水热法对温度要求较低,且反应在封闭容器中进行,有效地避免了组分的挥发,操作简便,所以采用水热法进行 Cd 掺杂纳米 ZnO 的制备。实验过程如下:首先在室温下取 30 mL 去离子水倒入烧杯中,加入 2.0 mmol 的氯化钠和 10.0 mmol 氢氧化钠混合搅拌以制备纯的氧化锌纳米花;然后另取加有 30 mL 去离子水的烧杯加入 2.0 mmol 氯化钠、0.1 mmol 氯化镉、10.0 mmol 氢氧化钠混合搅拌以制备 Cd 掺杂 ZnO 纳米花。待溶液均充分溶解后放入真空干燥箱中反应(80 ℃,24 h),反应结束后自然冷却至室温进而离心,得到白色沉淀物,用去离子水和无水乙醇清洗 3 次,以除去反

应过程中剩余的残留物,最后放入真空干燥箱中干燥(80 °C,12 h),得到白色粉末。

## 2.2 罗丹明 B 光催化降解实验

罗丹明 B 水溶液通过可见光和紫外光照射加以降解,反应过程中将配置溶液加到石英烧杯中进行实验,并在实验过程中用锡纸包覆以提高光利用率且避免室内照明的影响。首先称量罗丹明 B 药品,配置  $5.0 \times 10^{-5}$  mol/L 的罗丹明 B 水溶液,搅拌均匀后取 60 mL 罗丹明 B 溶液与 0.9 g 上述样品放入石英器皿中,然后在黑暗环境中搅拌 1 h 以达到吸附平衡,最后室温环境中在灯源下反应,每隔 1 h 取样,利用紫外-可见分光光度计测量,计算罗丹明 B 水溶液的降解率:

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

式中,  $A_0$ 、 $A_t$  分别为降解前后的吸光度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 结构特性及形貌

图 1 为纯 ZnO 与 Cd 掺杂纳米 ZnO 的 XRD 图。可以看出,掺杂前后的衍射峰均出现在  $2\theta = 31.8, 34.4, 36.3, 47.5, 56.6$  处,分别对应于 ZnO 的衍射峰(100)、(002)、(101)、(102)、(110),同

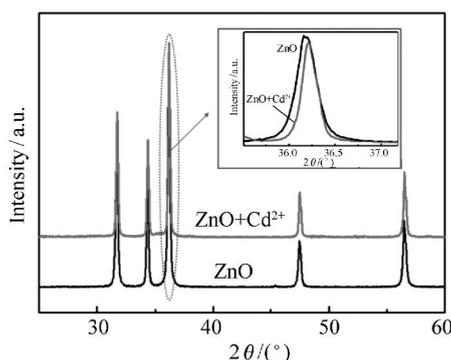
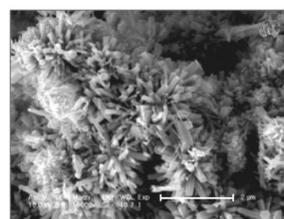


图 1 纯 ZnO 与 Cd 掺杂纳米花状 ZnO 的 XRD 图谱, 插图为(101)峰位移动图

Fig. 1 XRD patterns of the pure ZnO nanoflowers and ZnO nanoflowers doped with  $\text{Cd}^{2+}$ . Inset is enlarged XRD patterns of the peak positions of (101)

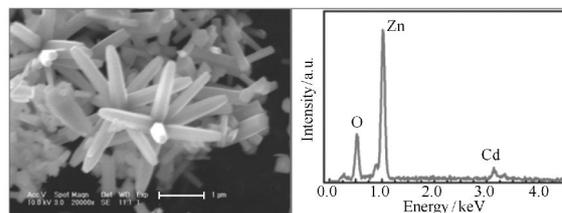
标准六方晶型的 ZnO 衍射峰相一致(JCPDS card 36-1451),说明水热法制备的样品为六角纤锌矿型结构。从图中还可以看出,掺 Cd 后其衍射峰的形状基本相同,说明其晶型没有发生改变,且 Cd 以离子形式存在于 ZnO 中<sup>[20]</sup>。当 Cd 掺杂后,各衍射峰的相对强度均减弱。此外,掺杂前后样品的峰位发生了少许偏移(见插图),这是因为 Cd、Zn 的离子半径不同<sup>[21]</sup>,尺寸较大的  $\text{Cd}^{2+}$  替代尺寸较小的  $\text{Zn}^{2+}$  而存在于结构中,而且掺杂后其粒径减小<sup>[22]</sup>。

图 2(a)、(b)分别为纯 ZnO 与 Cd 掺杂纳米 ZnO 的 SEM 图。可以看出,样品为上细下粗的锥形花状结构,掺杂后其直径约为 150 nm,形貌发生了轻微变化,这可能是因为  $\text{Cd}^{2+}$  与  $\text{Zn}^{2+}$  具有不同的原子半径,而在纳米光催化剂中掺杂  $\text{Cd}^{2+}$  并没有改变其结构,只是 Cd 取代了 Zn 的位置而存在于结构中,所以半径尺寸较大的  $\text{Cd}^{2+}$  替代  $\text{Zn}^{2+}$  后其形貌轻微改变。图 2(c)为 Cd 掺杂纳米 ZnO 的 EDS 图。从图中可以看出,随着 Cd 掺杂浓度的增大其峰的强度逐渐增强。



(a) 纯 ZnO 的 SEM 图

(a) SEM image of pure ZnO nanoflowers



(b) Cd 掺杂纳米 ZnO 的 SEM 图 (c) Cd 掺杂 ZnO 的 EDS 图谱  
(b) SEM image of ZnO nanoflowers doped with  $\text{Cd}^{2+}$  (c) EDS image of ZnO nanoflowers doped with  $\text{Cd}^{2+}$

图 2 纯 ZnO 和 Cd 掺杂 ZnO 的 SEM 图片

Fig. 2 SEM images of pure ZnO and Cd doped ZnO nanoflowers and EDS images of Cd doped ZnO nanoflowers

### 3.2 光学特性

图3为纯ZnO与Cd掺杂纳米ZnO的吸收图谱。从图中可以看出与纯纳米ZnO相比,Cd掺杂后样品在可见光区的相对吸收强度没有变化,而在紫外光区吸收明显增强,这是由于在氧化锌中引入Cd,在导带和价带之间形成中间的掺杂能级,价带电子吸收光后,从价带跃迁到中间能级,再吸收光子,从中间能级跃迁到导带,这样就降低了受激所需的能量,从而实现Cd掺杂纳米ZnO光催化剂的光谱响应范围向长波长方向移动,致使光谱响应范围扩宽<sup>[23]</sup>。从图中也可以看出Cd掺杂纳米ZnO样品,其吸收带边在392 nm处,带隙能为3.16 eV,与纯ZnO(吸收边:382 nm,带隙能:3.24 eV)相比发生了0.08 eV的红移,且禁带宽度呈线性减小趋势。可解释为:一是量子尺寸效应,随着Cd离子的掺杂使其晶粒增大;二是应力作用,Cd掺杂后c轴方向上的张应力会使晶格常数增大,而键长被拉长将导致键的本征振动频率减小,结果吸收带边向低能端发生移动<sup>[24]</sup>。综上所述,Cd<sup>2+</sup>掺杂可使纳米ZnO光催化剂的能带连续可调。

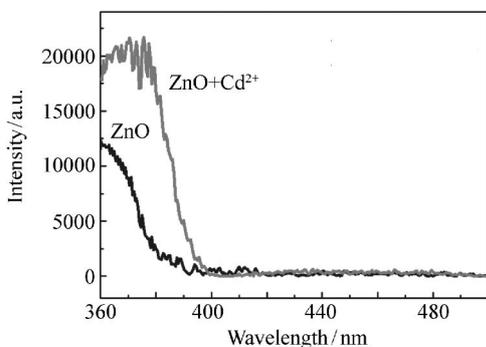


图3 纯ZnO与Cd掺杂纳米ZnO的吸收图谱  
Fig.3 Absorption spectra of the ZnO nanoflowers and ZnO nanoflowers doped with Cd<sup>2+</sup>

图4为纯ZnO与Cd掺杂纳米ZnO的PL图谱。从图中可以看出,两者皆存在紫外发光峰与缺陷发光峰,纯ZnO的紫外峰在381 nm处,为ZnO的带边发射<sup>[25-27]</sup>,带边发射形成紫外峰。众所周知,半导体纳米粒子的紫外发光主要由表面氧空位和缺陷引起的,因此在掺杂过程中表面氧空位和缺陷越多,紫外发光强度越强<sup>[28-29]</sup>。对比PL谱,随着Cd<sup>2+</sup>的掺入,未出现新的光致发光现

象,其缺陷发光峰相对强度增强且晶体质量变差导致带边发射峰强度下降。与此同时紫外发射峰逐渐向波长较大的方向移动,即发生了红移,表明其禁带宽度在减小,结果与纯ZnO与Cd掺杂纳米ZnO的吸收图谱现象相一致。

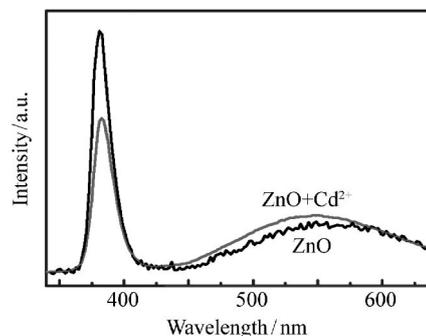


图4 纯ZnO与Cd掺杂纳米ZnO光催化剂的PL图谱  
Fig.4 PL spectra of the ZnO nanoflowers and ZnO nanoflowers doped with Cd<sup>2+</sup>

### 3.3 光催化活性

图5为纯ZnO与Cd掺杂纳米ZnO光催化剂对罗丹明B水溶液的光催化降解率随时间的变化图。由图可以看出,掺杂前后的ZnO光催化剂对罗丹明B水溶液的降解率随时间的延长而增加,前1 h内,降解率急速增长,而随着时间的延长,降解率增长趋势趋于缓慢。从图中还可以看出,掺杂Cd离子的纳米ZnO光催化剂对比纯ZnO对罗丹明B水溶液的降解率有所提高,这是

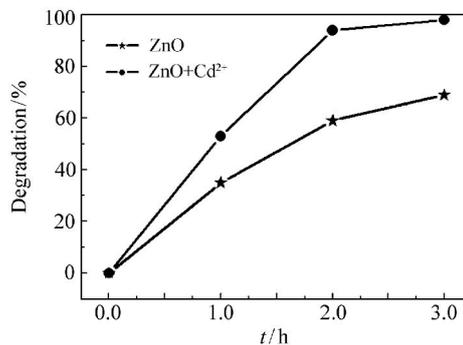


图5 罗丹明B水溶液(ZnO,ZnO+ Cd<sup>2+</sup>)光催化降解率随时间的变化图  
Fig.5 Photocatalytic degradation of RhB aqueous solution with ZnO nanoflowers and Cd<sup>2+</sup> doped ZnO nanoflowers

因为氧空位和缺陷可以成为光生电子的捕获中心,抑制电子空穴对的复合,而在氧化锌中掺杂镉离子后,相当于在其导带和价带之间形成中间的掺杂能级,使之成为空穴的浅势捕获阱,从而捕获光生电子和空穴而使其有效地分离,进而抑制电子空穴对的复合,提高其光催化活性<sup>[23,30]</sup>,Cd掺杂纳米 ZnO 光催化剂对罗丹明 B 水溶液的光催化降解率高达 98%。

## 4 结 论

采用水热法合成 Cd 掺杂纳米花状 ZnO 光催

化剂,并通过一系列测试手段对样品的物理性质进行表征。结果表明: Cd<sup>2+</sup> 掺杂前后的 ZnO 纳米花均出现紫外吸收边和紫外峰,且形貌发生轻微变化; ZnO 纳米花的吸收边和带边发射峰随着 Cd<sup>2+</sup> 的掺入而均发生红移现象,禁带宽度呈线性减小趋势; Cd<sup>2+</sup> 掺杂后 ZnO 纳米花对罗丹明 B 水溶液的降解较快,光照 3 h 后降解率高达 98%,光催化活性较高。镉的掺杂显著提高了 ZnO 的光催化活性,进而有望在净化环境领域中得到广泛应用。

### 参考文献:

- [1] 韩世同,习海玲,史瑞雪,等. 半导体光催化研究进展与展望[J]. 化学物理学报,2003,16(5):339-349.  
HAN SH T, XI H L, SHI R X, *et al.*. Prospect and progress in the semiconductor photocatalysis[J]. *Chem. Phys.*, 2003, 16(5):339-349. (in Chinese)
- [2] ZHANG Z Y, SHAO C L, LI X H, *et al.*. Electrospun nanofibers of ZnO-SnO<sub>2</sub> heterojunction with high photocatalytic activity[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114(17):7920-7925.
- [3] XIAO M W, WANG L S, WU Y D, *et al.*. Preparation and characterization of CdS nanoparticles decorated into titanate nanotubes and their photocatalytic properties[J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(1):015706-1-7.
- [4] YIN J, LIU Z G, LIU H, *et al.*. The epitaxial growth of wurtzite ZnO films on LiNbO<sub>3</sub>(0001) substrates[J]. *J. Crystal Growth*, 2000, 220:281-285.
- [5] LEE G H, YAMAMOTO Y, KOUROGI M, *et al.*. Blue shift in room temperature photoluminescence from photo-chemical vapor deposited ZnO films[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 386:117-120.
- [6] CHEN G W, ZHU R. Silicon micromachined resonant accelerometer based on ZnO nanowire[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1279-1285.
- [7] SUN T J, QIU J S, LIANG C H. Controllable fabrication and photocatalytic activity of ZnO nanobelt arrays[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(3):715-721.
- [8] PARK W I, KIM J S, YI G C, *et al.*. ZnO nanorod Logic circuits[J]. *Adv. Mater.*, 2005, 17(32):1393-1397.
- [9] KUO T J, LIN C N, KUO C L, *et al.*. Growth of ultralong ZnO nanowires on silicon substrates by vapor transport and their use as recyclable photocatalysts[J]. *Chem. Mater.*, 2007, 19(21):5143-5147.
- [10] GEORGEKUTTY R, SEERY M K, PILLAI S C. A highly efficient Ag-ZnO photocatalyst: synthesis, properties, and mechanism[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(35):13563-13570.
- [11] LI D M, LI J H, FANG X, *et al.*. Growth mechanism structural and optical properties of hexagonal cone-shaped ZnO nanostructure[J]. *Chin. Lumin.*, 2010, 31(1):114-118.
- [12] 程萍,顾明远,金燕苹. TiO<sub>2</sub>光催化剂可见光化研究进展[J]. 化学进展, 2005, 17(1):8-14.  
CHENG P, GU M G, JIN Y P. Recent progress in titania photocatalyst operating under visible light[J]. *Prog. Chem.*, 2005, 17(1):8-14. (in Chinese)
- [13] 陈崧哲,张彭义,祝万鹏,等. 可见光响应光催化剂研究进展[J]. 化学进展, 2004, 16(4):613-619.  
CHEN S Z, ZHANG P Y, ZHU W P, *et al.*. Progress in visible light responding photocatalysts[J]. *Prog. Chem.*, 2004, 16(4):613-619. (in Chinese)
- [14] CHIOU J W, RAY S C, TSAI H M, *et al.*. Correlation between electronic structures and photocatalytic activities of nanocrystalline-(Au, Ag, and Pt) particles on the surface of ZnO nanorods[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2011, 115:2650-2655.

- [15] WANG Y S, JOHN P, BRIEN P O. Optical properties of ZnO nanocrystals doped with Cd, Mg, Mn, and Fe ions[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2006, 110(43): 21412-21415.
- [16] ZHOU S M, MENG X M, ZHANG X H, *et al.*. Large-scale fabrication and characterization of Cd-doped ZnO nanocantilever arrays[J]. *Micron*, 2005, 36: 55-59.
- [17] ZHOU S M, ZHANG X H, MENG X M, *et al.*. Fabrication of large-scale ultra-fine Cd-doped ZnO nanowires[J]. *Mater. Research Bull.*, 2006, 41: 340-346.
- [18] YAKUPHANOGLU F, ILICAN S, CAGLAR M, *et al.*. Microstructure and electro-optical properties of sol-gel derived Cd-doped ZnO films[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2010, 47: 732-743.
- [19] LI B X, WANG Y F. Facile synthesis and enhanced photocatalytic performance of flower-like ZnO hierarchical microstructures[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114(2): 890-896.
- [20] 兰飞飞, 王金忠, 王敦博, 等. Cu 掺杂 ZnO 纳米材料的制备及表征[J]. 发光学报, 2013, 34(2): 139-143.  
LAN F F, WANG J ZH, WANG D B, *et al.*. Preparation and characterization of Cu-doped ZnO nano materials[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 34(2): 139-143. (in Chinese)
- [21] VIGIL O, VAILLANT L, CRUZ F, *et al.*. Spray pyrolysis deposition of cadmium-zinc oxide thin films[J]. *Thin Solid Films*, 2000, 361(362): 53-55.
- [22] 杜鸿延, 魏志鹏, 孙丽娟, 等. 与掺杂浓度相关的 ZnS:Mn 纳米粒子的发光性质[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 111-116.  
DU H Y, WEI ZH P, SUN L J, *et al.*. Luminescent properties of ZnS:Mn nanoparticles dependent on doping concentration [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 111-116. (in Chinese)
- [23] 吉列凤, 王丹军, 郭莉, 等. 钪、镉共掺杂纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化剂的合成及其光催化性能研究[J]. 延安大学学报, 2010, 29(2): 71-75.  
JI L F, WANG D J, GUO L, *et al.*. Synthesis of Gd-Cd Co-doped nano TiO<sub>2</sub> photocatalyst and its photocatalytic activity [J]. *J. Yanan University*, 2010, 29(2): 71-75. (in Chinese)
- [24] 陈航, 邓宏, 戴丽萍, 等. 掺 Cd 对 ZnO 薄膜光学性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2008, 37(1): 213-217.  
CHEN H, DENG H, DAI L P, *et al.*. Cd-doping effects on structure and optical properties of ZnO thin films[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2008, 37(1): 213-217. (in Chinese)
- [25] 罗添元, 魏志鹏, 李金华, 等. Cd/ZnO 纳米复合结构的制备、表征及其光催化活性的改善[J]. 发光学报, 2011, 32(7): 680-685.  
LUO T Y, WEI Z P, LI J H, *et al.*. Synthesis and characterization of CdS/ZnO nano-composites structure and enhanced photocatalytic[J]. *Chin. Lumin.*, 2011, 32(7): 680-685. (in Chinese)
- [26] ZHAO L L, WANG J Y, BOUGHTON R I, *et al.*. The surface morphology and photoluminescence properties of ZnO crystals synthesized by flux method[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2012, 33(9): 917-922.
- [27] 徐志堃, 赵东旭, 孙兰兰, 等. 海胆状 ZnO 纳米线阵列的制备及其光学性能[J]. 发光学报, 2012, 33(9): 1001-1005.  
XU ZH K, ZHAO D X, SUN L L, *et al.*. Fabrication and optical properties of urchin-like ZnO nanowire arrays[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2012, 33(9): 1001-1005. (in Chinese)
- [28] 孙晓琦, 孟庆华, 孟庆云. 镉掺杂氧化锌纳米棒阵列材料的制备及光学性能研究[J]. 发光学报, 2013, 34(5): 573-578.  
SUN X Q, MENG Q H, MENG Q Y. Fabrication and optical properties of Eu-doped ZnO nanorod arrays[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 34(5): 573-578. (in Chinese)
- [29] 徐志堃, 赵东旭, 孙兰兰, 等. ZnO 薄膜的性质对水热生长 ZnO 纳米线阵列的影响[J]. 发光学报, 2012, (5): 549-552.  
XU ZH K, ZHAO D X, SUN L L, *et al.*. Influences of ZnO film characteristics on ZnO nanowire arrays prepared by hydrothermal method[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2012, (5): 549-552. (in Chinese)
- [30] SONG X C, ZHENG Y F, LIU G, *et al.*. Photocatalytic activities of Cd-doped ZnWO<sub>4</sub> nanorods prepared by a hydrothermal process[J]. *J. Hazardous Materials*, 2010, 179: 1122-1127.

## 作者简介:



翟英娇(1988—),女,吉林长春人,硕士研究生,2011年于长春理工大学获得学士学位,主要从事纳米材料的光学性质方面的研究。E-mail:zhaiyingjiao0613@sina.com



宋星慧(1992—),女,吉林人,本科,主要从事光信息科学与技术方面的研究。E-mail:xinghui\_1120@sina.com



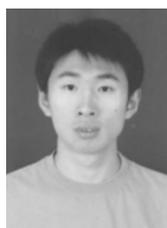
李金华(1977—),女,吉林长春人,博士,副教授,博士生导师,2000年、2003年于东北师范大学分别获得学士、硕士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事宽禁带半导体纳米材料的物性方面的研究。E-mail:Jhli\_cust@163.com



任航(1993—),女,吉林长春人,本科,主要从事光信息科学与技术方面的研究。E-mail:kjoy1710@163.com



陈新影(1986—),女,吉林公主岭人,博士,2009年于吉林师范大学获得学士学位,主要从事纳米光电子材料与器件物理方面的研究。E-mail:happy-chenxinying@163.com



方铨(1983—),男,吉林人,硕士,讲师,2006年、2009年于长春理工大学获得学士、硕士学位,主要从事宽禁带半导体纳米材料的物性方面的研究。E-mail:fangxuan110@hotmail.com



方芳(1982—),女,辽宁海城人,博士,讲师,2003年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2006年于南昌大学获得硕士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,2009-2010年在香港大学从事博士后研究工作,主要从事半导体材料与器件方面的研究。E-mail:fang\_fang0131@126.com



魏志鹏(1978—),男,吉林长春人,博士,副教授,2000年于吉林大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,2008-2009年在新加坡南洋理工大学从事博士后研究工作,主要从事光电子材料与器件方面的研究。E-mail:zhipengwei@gmail.com



楚学影(1982—),女,吉林公主岭人,博士,讲师,2006年、2011年于东北师范大学获得学士、博士学位,主要从事纳米材料物性及生物特性方面的研究。E-mail:chuxy608@163.com



王晓华(1967—),女,黑龙江青冈人,博士,教授,1990年于东北林业大学获得学士学位,1993年于长春光学精密机械学院获得硕士学位,2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电方面的研究。E-mail:biewang2001@126.com