

ZnO/ZnS 核壳纳米线界面缺陷的形成及发光特性研究

赵海霞¹, 方 铨^{1*}, 王颜彬¹, 房 丹¹, 李永峰²,

王登魁¹, 王晓华¹, 楚学影^{1,4}, 张晓东³, 魏志鹏¹

(1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130012;

3. 中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123;

4. 哈尔滨师范大学 光电带隙材料省部共建教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要: ZnO/ZnS 核壳纳米结构因具有优异的光电特性, 在光电子领域极具应用前景, 其依靠核壳结构界面处载流子的束缚效应可更加有效地控制载流子的产生、传输和复合过程。为讨论 ZnO/ZnS 核壳结构界面状态及其相应的光学特性, 生长了不同程度硫粉硫化的 ZnO/ZnS 核壳纳米线, 再利用扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM) 及光致发光光谱 (PL) 等测试表征手段, 分析并讨论经过不同程度硫粉硫化后的 ZnO/ZnS 核壳纳米线界面处的结构及其光学性质的变化。通过分析 ZnO/ZnS 核壳结构形貌发现, ZnS 成功包覆 ZnO 纳米线。随着硫化程度的增加, ZnO 核结构被破坏, 并在核壳界面处引入缺陷, 导致形成具有不同结晶质量的 ZnO/ZnS 核壳纳米线结构, 从而会影响 ZnO/ZnS 核壳纳米线的光学性质。结果表明, ZnO/ZnS 核壳界面处缺陷较少时, 对载流子的产生和传输具有一定的束缚作用, 可以抑制非辐射复合效应, 提高材料光学性能; 当界面缺陷增加时, 形成的缺陷能级则会降低材料的光学性能。

关键词: 核壳纳米结构; 束缚态能级; 界面缺陷; 光致发光

中图分类号: O474 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20191204.0872

Formation of interface defects of ZnO/ZnS core-shell nanowires and its optical properties investigations

ZHAO Hai-xia¹, FANG Xuan^{1*}, WANG Yan-bin¹, FANG Dan¹, LI Yong-feng²,

WANG Deng-kui¹, WANG Xiao-hua¹, CHU Xue-ying^{1,4}, ZHANG Xiao-dong³, WEI Zhi-peng¹

(1. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun

收稿日期: 2018-11-27; 修订日期: 2019-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11674038); 吉林省科技发展计划项目 (No. 20160520117JH, No. 20170520118JH, No. 20160204074GX, No. 20160203015GX); 长春理工大学科技创新基金 (No. XJLJL-2016-11, No. XJLJL-2016-14); 中国科学院纳米器件与应用重点实验室开放基金 (No. 18JG01)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11674038); Developing Project of Science and Technology of Jilin Province (No. 20160520117JH, No. 20170520118JH, No. 20160204074GX, No. 20160203015GX); Innovation Foundation of Changchun University of Science and Technology (No. XJLJL-2016-11, No. XJLJL-2016-14); Open Foundation of Key Laboratory of Chinese Academy of Sciences Nano Device and Application (No. 18JG01)

University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China;

*3. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics (SINANO),
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;*

*4. Key Laboratory for Photonic and Electric Bandgap Materials,
Ministry of Education, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)*

** Corresponding author, E-mail:fangxuan110@126.com*

Abstract: ZnO/ZnS core-shell nanostructures have great application prospects in optoelectronic area due to their excellent optoelectronic properties. They rely mainly on the binding effect of carriers at the interface of the core-shell structure to more effectively control carrier generation, transmission and recombination processing. In order to discuss the interfacial state of ZnO/ZnS core-shell structure and its corresponding optical properties, ZnO/ZnS core-shell nanowires with different amounts of sulfur powder vulcanization were grown and then characterized using scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), Photoluminescence spectroscopy (PL). Analysis and discussion were conducted for the structure and optical properties of the ZnO/ZnS core-shell nanowire interface after sulfurization with different amounts of sulfur powder. By analyzing the morphology of the ZnO/ZnS core-shell structure, it was found that ZnS successfully coated ZnO nanowires and with the increase of vulcanization degree, the ZnO core structure was destroyed and defects were introduced at the core-shell interface, resulting in forming ZnO/ZnS core-shell structure with different crystal qualities. The structure affects the optical properties of ZnO/ZnS core-shell nanowires. The results show that when few defects appear at the interface of the ZnO/ZnS core shell, they have a binding effect on the generation and transport of carriers, thus inhibiting the non-radiative composite effect and improving the optical properties of the material. When the interface defects increase, the formed defect energy level reduces the optical properties of the material.

Key words: core-shell nanostructures; localized states; interface defects; photoluminescence

1 引言

作为直接带隙半导体材料, ZnO 具有较宽的禁带宽度 (3.37 eV) 和较大的激子束缚能 (60 meV), 在紫外探测器和发光二极管等光电子器件中具有广泛的应用前景^[1]。随着 ZnO 材料形貌及尺寸的改善, 一维 ZnO 纳米结构 (如纳米线, 纳米管及纳米带等) 在应用于纳米光电子器件方面也取得了飞跃的进展^[2-3]。然而与体材料相比, ZnO 纳米线等结构随着比表面积的增加, 表面杂质和缺陷 (如氧空位缺陷和锌间隙缺陷等) 也逐渐增加^[4], 影响了 ZnO 纳米线的光学及物理性能。因此, 改善 ZnO 纳米线的结构及发光特性对其器件性能的提升至关重要^[5]。

与单一的纳米结构相比, 核壳纳米结构在光学和电学特性上表现出更大的优势^[6-7]。同属 II ~ VI 族宽带系半导体的 ZnS 材料, 室温禁带宽度为 3.66 eV, 其比 ZnO 材料具有更稳定的化学性质^[8], 是包覆 ZnO 的良好选择。ZnO/ZnS 的核壳结构在载流子产生和传输方面表现出极大的应用潜力, 并被广泛应用于紫外探测、光催化、光电池等领域。大量研究表明, 在 ZnO/ZnS 核壳结构界面处引入束缚态能级, 可以调控核壳纳米结构中载流子的辐射复合过程, 从而实现对发光器件波长, 以及探测器件响应度的调控^[8-12]。由于 ZnO/ZnS 核壳结构界面处的局域态可以使其表现出优异的光学性能, 引起了研究者的广泛兴趣, 并使用多种方法合成 ZnO/ZnS 的核壳结构, 如磁控溅射^[13], 化学气相沉积 (CVD) 的固相反应^[14]、溶液

法^[15]、热蒸发法等^[16]。而在合成过程中缺陷的产生方式,及其引起的光学性能变化也成为重要的研究内容^[17-19]。文献[20]中,利用 CVD 系统并通过表面硫化工艺合成 ZnO/ZnS 核壳纳米线。通过 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 进行表征,讨论了硫化程度对核壳纳米线形貌和结构性能的影响,并通过调节硫粉剂量,得到不同硫化程度的 ZnO/ZnS 样品。然后,利用光致发光 (PL) 方法研究由表面硫化引起的光学性质和相关缺陷的变化。此外,研究还表明,随着硫化程度的增加,ZnO/ZnS 核壳纳米线紫外光致发光发射强度变低,而缺陷发射峰强度先增强后减弱,从而提出这是由在 ZnO/ZnS 核壳纳米线的形成过程中存在于界面处的缺陷,引入束缚态导致的,这将影响 ZnO/ZnS 的光学性能。但是,之前的研究是基于光致发光光谱的变化对缺陷态的分析,没有直观展现界面处晶格结构的变化。

为进一步确定研究 ZnO/ZnS 核壳纳米线中的界面情况,对硫化程度不同的 ZnO 纳米线进行扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM) 及光致发光 (PL) 表征,并分析讨论硫化程度不同的 ZnO/ZnS 核壳纳米线界面结构及光致发光峰的变化。结果表明,ZnS 的引入会在异质界面处引入缺陷,对 ZnO 结构造成破坏从而形成束缚态能级,并在 PL 测试过程中出现 ZnO/ZnS 核壳纳米线紫外发光峰蓝移、缺陷峰增强的现象。总之,调整和改善 ZnO/ZnS 的壳层性能,对于制造优异的核壳结构光电子器件具有重要意义。

2 实验

ZnO 纳米线的生长:通过磁控溅射在 Si 上制备 ZnO 晶种。将醋酸锌和六亚甲基四胺分别在室温下以等摩尔浓度溶解在去离子水中。在混合和均匀搅拌后,将水溶液转移到聚四氟乙烯中,在 95 °C 恒温下加热 12 h,醋酸锌提供 Zn⁺ 并与来自六亚甲基四胺的 OH⁻ 反应。最后取出用蒸馏水洗涤并在 60 °C 下在空气中干燥^[21]。

ZnO/ZnS 核壳纳米线制备方法:通过磁控溅射在 Si 上制备 ZnO 纳米线,将生长的 ZnO 纳米线样品放置在石墨盒的一端,并且在盒子的另一

端分别放置 2、5、10 mg 硫粉,然后将覆盖的石墨盒转移到中间石英管中并以 5 °C/min 的加热速率加热至 500 °C。使用高纯度氩气 (99.99%) 作为吹扫气体,反应时间为 30 min。完成后,将炉冷却至室温,然后取出样品,待测。

测试与表征:采用型号为 S-4800 (日本日立) 的场发射电子显微镜测试样品表面形貌;使用在 200 kV 下操作的 FEI Tecnai G2 F20 显微镜获得透射电子显微镜 (TEM) 图像;采用 LabRAM HR800 UV 型共焦显微拉曼谱仪 (HORIBA),以 325 nm 的 He-Cd 激光器作为激励光源进行 PL 测试。

3 结果与讨论

图 1 为分别经过 2、5、10 mg 硫粉硫化的 ZnO/ZnS 核壳纳米线的 SEM 图,插图为 ZnO/ZnS 核壳纳米线直径分布直方图。

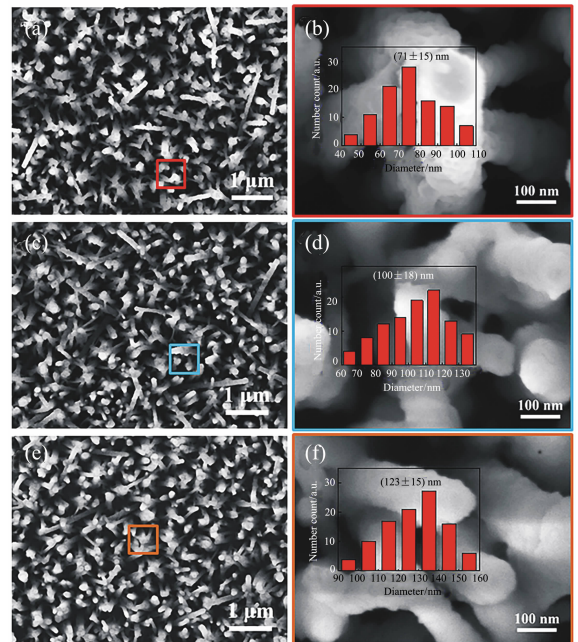


图 1 不同剂量硫粉硫化的 ZnO/ZnS 核壳纳米线的 SEM 图像,(a)、(b) 2 mg,(c)、(d) 5 mg,(e)、(f) 10 mg,插图为相应的直径分布图

Fig. 1 SEM of ZnO/ZnS core-shell nanowires with different amounts of sulfur powder, (a)、(b) 2 mg, (c)、(d) 5 mg, (e)、(f) 10 mg. Insets show the corresponding diameter distributions

由图1可以看到,具有高密度的ZnO/ZnS核壳纳米线在Si衬底上均匀分布,并且2 mg硫粉硫化得到的ZnO/ZnS核壳纳米线表面较粗糙,直径约为71 nm,5 mg硫粉硫化得到的ZnO/ZnS核壳纳米线直径约为100 nm,而10 mg硫粉硫化得到的ZnO/ZnS核壳纳米线直径最大约为123 nm,表面粗糙度减小。随着硫粉剂量的增加,ZnO/ZnS核壳纳米线表现出直径增大、表面粗糙度减小的现象是由于硫粉硫化时对ZnO纳米线表面的刻蚀导致的,接下来对其进行详细分析。

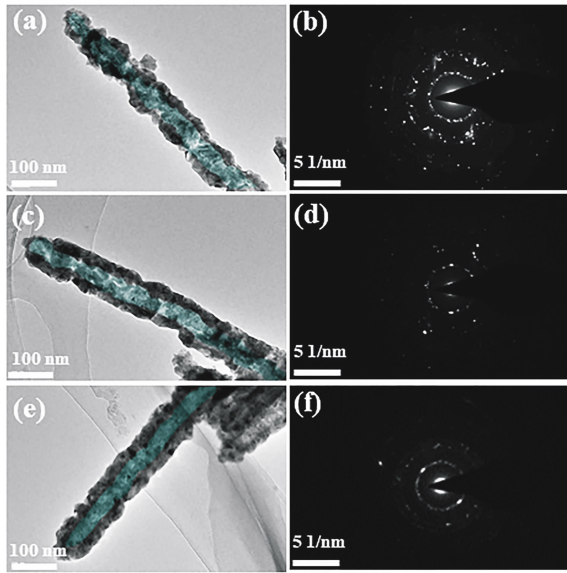


图2 不同剂量硫粉硫化的ZnO/ZnS核壳纳米线TEM图像(a)2 mg,(c)5 mg,(e)10 mg;(b)、(d)、(f)为相应的SAED(Selected Area Electron Diffraction)图像

Fig. 2 TEM images of ZnO/ZnS core-shell nanowires with different amounts of sulfur powder (a) 2 mg, (c) 5 mg, (e) 10 mg and corresponding SAED image (b), (d), (f)

通过透射电子显微镜(TEM)对3种样品进行更深入的形貌测试分析,如图2所示。其中,图2(a)、2(c)、2(e)分别是2、5、10 mg硫粉硫化得到的ZnO/ZnS核壳纳米线的TEM图。纳米线分为内外两层,其中内层核结构为ZnO,外层壳结构为ZnS,并且可以清晰地看到随着硫粉剂量的逐渐增多,ZnO/ZnS核壳界面越来越清晰。2 mg硫粉硫化得到的ZnO/ZnS核壳纳米线表面较粗糙,

纳米线直径较小并且核壳界面较为混乱,壳层较薄;当10 mg硫粉硫化ZnO纳米线时,纳米线的表面粗糙度明显减小,直径增大,并且出现清晰的核壳界面,同时壳层厚度增加。这些实验结果进一步说明硫化过程是对ZnO纳米线的刻蚀过程^[22],纳米线的表面形貌取决于刻蚀过程与硫化过程的强弱对比。当硫粉剂量较小时,生成ZnS壳层不能完全填补刻蚀形成的凹坑,适当增加硫粉剂量后,生成的ZnS壳层可以逐渐填补纳米线表面,当使用大量的硫粉硫化纳米线时,在ZnO外形成了很厚的ZnS壳层,此时纳米线的直径显著增加,且表面变得相对平整。图2(b)、2(d)、2(f)分别为2(a)、2(c)、2(e)通过TEM获得的相应SAED衍射图,其中显示出的斑点图案,对应于ZnO单晶的TEM衍射图,而观察到显著的衍射圆环,则与多晶ZnS纳米颗粒一致^[23],证明ZnS纳米颗粒已成功引入。而在图中观察到的衍射斑亮度随硫化程度而改变的现象,表明ZnO核在ZnO/ZnS核壳纳米线中晶体质量的不一致性^[24]。

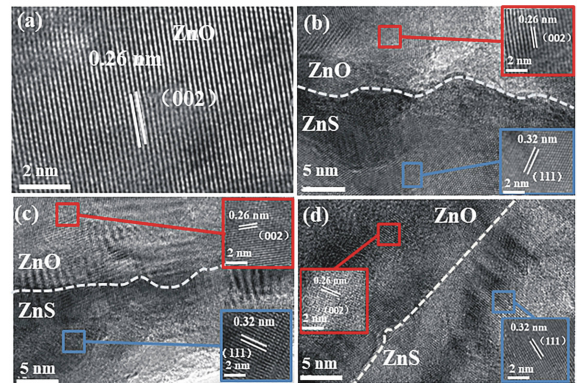


图3 纯ZnO纳米线(a)及不同剂量硫粉(b)2 mg,(c)5 mg,(d)10 mg硫化的ZnO/ZnS核壳纳米线HRTEM图像,插图为ZnO纳米线和ZnS纳米颗粒的晶格条纹间距

Fig. 3 HRTEM images of (a) pure ZnO nanowires and ZnO/ZnS core-shell nanowires with different amounts of sulfur powder (b) 2 mg, (c) 5 mg, (d) 10 mg; inset shows the lattice fringe space of ZnO nanowires and ZnS nanoparticles

图3为纯ZnO纳米线和ZnO/ZnS核壳纳米线的高分辨透射电子显微镜(HRTEM)图像,图中的插图分别是ZnO纳米线(红色)和ZnS纳米颗

粒(蓝色)的晶格条纹间距(彩色见期刊电子版), ZnO 核晶格条纹间距约为 0.26 nm, 对应于六方纤锌矿结构 ZnO 的(002)面晶格距离; ZnS 壳层晶格条纹间距约为 0.32 nm, 对应于闪锌矿结构 ZnS 的(111)平面^[18,25], 这也证实了 ZnS 的成功生长。图 3(b)、3(c)、3(d) 分别对应 2、5、10 mg 硫粉硫化得到的 ZnO/ZnS 核壳纳米线的 HRTEM

图。图中上部分为 ZnO 纳米线, 下部分为 ZnS 颗粒。可以清楚地看到核和壳之间的界面, 图中使用白色虚线标记。硫粉剂量较大时, 核壳之间的界面较为平整, 层错现象减弱, 说明随着硫化程度的增加, ZnO/ZnS 核壳纳米线结构的完整性逐渐增强, 同时在光致发光中表现出界面束缚态减弱的现象。

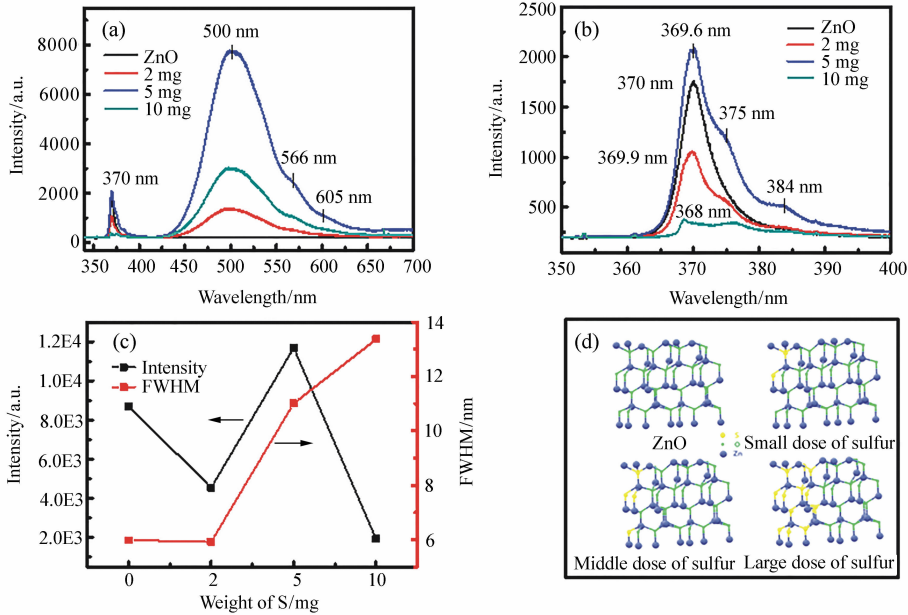


图 4 (a) 10 K 时 ZnO 纳米线及不同剂量硫粉硫化的 ZnO/ZnS 核壳纳米线 PL 光谱, (b) 10 K 时 UV 区域光谱图, (c) ZnO 纳米线及经过不同剂量硫粉硫化后 10 K 时 UV 区域 PL 光谱强度及半峰宽, (d) ZnO/ZnS 硫化过程球棍模型

Fig. 4 (a) PL spectra of ZnO nanowires and ZnO/ZnS core-shell nanowires with different amounts of sulfur powder at 10 K, (b) UV region spectra at 10 K, (c) PL spectral intensities and FWHMs of ZnO nanowires and ZnO/ZnS core-shell nanowires with different amounts of sulfur powder at 10 K, (d) ZnO/ZnS ball model with different sulfuration degrees

为了进一步分析硫化对 ZnO/ZnS 核壳纳米线光学性质的影响, 对不同硫化程度的 ZnO/ZnS 核壳纳米线 10 K 温度下的光致发光光谱进行测试, 如图 4(a) 所示。图 4(b) 为图 4(a) 在 350 ~ 400 nm 波长内的放大图。由图可知, 370 nm 的发射峰归因于中性供体结合激子 (D^0X) 的辐射复合, 375 nm 和 384 nm 两个峰为 FX-1LO 和 FX-2LO 发光^[26-27]。随着硫粉剂量的增加, 出现以 500 nm 为发光中心的深能级发光, 呈现先增强后减弱的趋势。其中, 5 mg 硫粉硫化后的纳米线缺陷峰发光强度最大, 2 mg 硫粉硫化后的纳米线缺陷峰发光强度最小。500 nm 处的峰位是硫化之

后产生的, 说明此峰位与硫化相关。图 4(a) 中硫化后的发光峰峰形不对称, 同时出现了 566 nm 的峰位以及 605 nm 的峰位, 这种现象也说明在硫化过程中会在 ZnO 纳米线或者 ZnO/ZnS 核壳界面处引入各种缺陷, 比如锌空位, 氧空位, 硫空位等^[4,27-29]。随着硫化程度的增加, 紫外区域的发光峰则呈现出峰位蓝移的现象。这是由于两种具有不同带隙的材料构成的半导体异质结导致的。ZnO/ZnS 核壳纳米线硫化过程球棍模型如图 4(d) 所示, 当小剂量硫粉硫化 ZnO 纳米线时, S^{2-} 扩散到 ZnO 纳米线表面, 溶解 ZnO 纳米线取代 O^{2-} 获取 Zn^{2+} 。当增大硫粉剂量时, S^{2-} 和 Zn^{2+}

通过离子扩散穿过纳米线,形成 ZnS 并附着在纳米线表面,形成 ZnS 壳层。由于 ZnS 的禁带宽度大于 ZnO 的禁带宽度,在硫化过程中, S^{2-} 进入 ZnO 纳米线中形成 ZnO_xS_{1-x} 复合结构^[30]。这种复合结构的带隙能大于 ZnO 材料,小于 ZnS。所以与 ZnO 材料的带边发光峰不同,ZnO/ZnS 核-壳纳米线的带边发光峰出现明显的蓝移现象。

图 4(c) 为 370 nm 处 UV 区域发光峰半峰宽和发光峰强度变化图。由于未硫化时 ZnO 表面束缚态较少,小剂量硫粉硫化时,硫原子进入 ZnO 中使的 Zn-O 键断裂,导致界面束缚态增加,随着硫化程度的增加,ZnO/ZnS 核壳纳米线逐渐完整,束缚态减小。图 4 中光致发光的变化趋势证明,ZnO/ZnS 核壳纳米线的界面缺陷会影响其光致发光效果。

参考文献:

- [1] MA X M, YE H G, DUAN X Y, *et al.*. Abnormal gas pressure sensitivity of the visible emission in ZnO quantum dots prepared by improved sol-gel method: the role of surface polarity[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(48): 29992-29997.
- [2] HUAN X, WANG M, WILLINGER M G, *et al.*. Assembly of three-dimensional hetero-epitaxial ZnO/ZnS core/shell nanorod and single crystalline hollow ZnS nanotube arrays[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(8): 7333-7339.
- [3] 黄海平, 吕连连, 陈重镇, 等. 基于多壁碳纳米管-氧化钨纳米复合材料的多巴胺电化学传感器[J]. *分析化学*, 2018, 46(5): 765-772.
HUANG H P, LV L L, CHEN ZH ZH, *et al.*. Electrochemical dopamine sensor based on multi-walled carbon nanotubes-tungsten oxide nanocomposites[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(5): 765-772. (in Chinese)
- [4] CHEN R, YE Q L, HE T CH, *et al.*. Exciton localization and optical properties improvement in nanocrystal-embedded ZnO core-shell nanowires[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 734-739.
- [5] YAN J, FANG X SH, ZHANG L D, *et al.*. Structure and cathodo luminescence of individual ZnS/ZnO biaxial nanobelt heterostructures[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(9): 2794-2799.
- [6] JEONG S, KIM M W, JO Y R, *et al.*. Crystal-structure-dependent piezotronic and piezo-phototronic effects of ZnO/ZnS core/shell nanowires for enhanced electrical transport and photosensing performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(34): 28736-28744.
- [7] 胡明江, 崔秋娜, 虞婷婷, 等. 基于氧化锌/聚苯胺复合材料的薄膜型甲醇传感器研究[J]. *分析化学*, 2018, 46(8): 1201-1207.
HU M J, CUI Q N, YU T T, *et al.*. Research on film-type methanol sensor based on ZnO/polyaniline nanocomposites[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(8): 1201-1207. (in Chinese)
- [8] FANG X, WEI ZH P, YANG Y H, *et al.*. Ultraviolet electroluminescence from ZnS@ZnO core-shell nanowires/p-GaN introduced by exciton localization[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(3): 1661-1666.
- [9] FANG X, WANG X Y, TANG J L, *et al.*. Synthesis and characterization of ZnO/Ag-doped ZnO core-shell nanowires[J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2015, 7(8): 643-647.
- [10] RAI S C, WANG K, DING Y, *et al.*. Piezo-phototronic effect enhanced UV/visible photodetector based on fully wide band gap type-II ZnO/ZnS core/shell nanowire array[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(6): 6419-6427.
- [11] MARANA N L, LAPORTA F A, LONGO E, *et al.*. Theoretical study on band alignment mechanism for the ZnO/ZnS in-

4 结 论

通过对 ZnO/ZnS 核壳纳米线形貌及光学特性的分析发现,不同剂量硫粉硫化的 ZnO 纳米线,可以形成具有不同结晶质量和不同光致发光性能的 ZnO/ZnS 核壳纳米线。研究发现,当界面缺陷较少时,会抑制非辐射复合效应,提高材料光学性能;而随着界面缺陷的增加,形成的缺陷能级会降低材料的光学性能。所以,只有界面缺陷达到一个合适的值时,对材料光学性能的改进作用最大,从而可以使其更好地应用于光电子器件中。这一结果为制备新一代半导体光电器件提供理论基础。

- terface of core/shell structures[J]. *Current Physical Chemistry*,2016,5(4):327-336.
- [12] WANG K, CHEN J J, ZENG Z M, *et al.*. Synthesis and photovoltaic effect of vertically aligned ZnO/ZnS core/shell nanowire arrays[J]. *Applied Physics Letters*,2010,96(12):123105.
- [13] GU X Q, ZHANG SH, ZHAO Y L, *et al.*. Band alignment of ZnO/ZnS heterojunction prepared through magnetron sputtering and measured by X-ray photoelectron spectroscopy[J]. *Vacuum*,2015,122:6-11.
- [14] MYONG S Y, BAIK S J, LEE C H, *et al.*. Extremely transparent and conductive ZnO: Al thin films prepared by photo-assisted metal/organic chemistry vapor deposition(photo-MOCVD) using $\text{AlCl}_3(6\text{H}_2\text{O})$ as new doping material[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*,1997,36(Part 2, No. 8B):L1078-L1081.
- [15] YAN CH L, XUE D F. Conversion of ZnO nanorod arrays into ZnO/ZnS nanocable and ZnS nanotube arrays via an in situ chemistry strategy[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*,2006,110(51):25850-25855.
- [16] SULIEMAN K M, HUANG X T, LIU J P, *et al.*. One-step growth of ZnO/ZnS core-shell nanowires by thermal evaporation [J]. *Smart Materials and Structures*,2006,16(1):89.
- [17] LI R X, WEI ZH P, ZHAO F H, *et al.*. Investigation of localized and delocalized excitons in ZnO/ZnS core-shell heterostructured nanowires[J]. *Nanophotonics*,2017,6(5):1093-1100.
- [18] LI R X, WEI ZH P, FANG X, *et al.*. Localized-state-dependent electroluminescence from ZnO/ZnS core shell nanowires GaN heterojunction[J]. *ACS Applied Nano Materials*,2018,1(4):1641-1647.
- [19] FANG X, WEI ZH P, CHEN R, *et al.*. Influence of exciton localization on the emission and ultraviolet photoresponse of ZnO/ZnS core-shell nanowires[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2015,7(19):10331-10336.
- [20] WANG Y B, FANG X, LI R X, *et al.*. Surface sulfurization of ZnO/ZnS core shell nanowires and shell layers dependent optical properties[J]. *Journal of Materials Science:Materials in Electronics*,2018,29(9):7924-7929.
- [21] FANG X, LI J H, ZHAO D X, *et al.*. Phosphorus-doped p-type ZnO nanorods and ZnO nanorod p-n homojunction LED fabricated by hydrothermal method[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*,2009,113(50):21208-21212.
- [22] DLOCZIK L, ENGELHARDT R, ERNST K, *et al.*. Hexagonal nanotubes of ZnS by chemical conversion of monocrystalline ZnO columns[J]. *Applied Physics Letters*,2001,78(23):3687-3689.
- [23] SHUAI X M, SHEN W Z. A facile chemical conversion synthesis of ZnO/ZnS core/shell nanorods and diverse metal sulfide nanotubes[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*,2011,115(14):6415-6422.
- [24] TARISH S, WANG ZH J, AL-HADDAD A, *et al.*. Synchronous formation of ZnO/ZnS core/shell nanotube arrays with removal of template for meliorating photoelectronic performance[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*,2015,119(3):1575-1582.
- [25] ZHAO X, FENG J, LIU J, *et al.*. Metal-organic framework-derived ZnO/ZnS heteronano structures of efficient visible-light-driven photocatalytic hydrogen production[J]. *Advanced Science*,2018,5(4):1700590.
- [26] 王泽岚, 周艳芬, 孟哲, 等. 核壳聚苯胺选择性磁性固相萃取-高效液相色谱-质谱法测定牛奶中痕量磺胺类药物[J]. *分析化学*,2019,47(1):119-128.
- WANG Z L, ZHOU Y F, MENG ZH, *et al.*. Determination of trace sulfonamides antibiotics in milk using polyaniline silicon magnetic composite selective magnetic solid phase extraction combined with high performance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*,2019,47(1):119-128. (in Chinese)
- [27] 翟英娇, 李金华, 陈新影, 等. 镉掺杂氧化锌纳米花的制备及其光催化活性[J]. *中国光学*,2014,7(1):124-130.
- ZHAI Y J, LI J H, CHEN X Y, *et al.*. Synthesis and characterization of Cd-doped ZnO nanoflowers and its photocatalytic activity[J]. *Chinese Optics*,2014,7(1):124-130. (in Chinese)
- [28] CHEN Y N, XU S J, ZHENG C C, *et al.*. Nature of red luminescence band in research-grade ZnO single crystals: a “self-activated” configurational transition[J]. *Applied Physics Letters*,2014,105(4):041912.
- [29] HU Y, QIAN H H, LIU Y, *et al.*. A microwave-assisted rapid route to synthesize ZnO/ZnS core-shell nanostructures via controllable surface sulfidation of ZnO nanorods[J]. *CrystEngComm*,2011,13(10):3438-3443.
- [30] 冯仕, 李金钗, 冯秀丽. ZnO/ZnS 核-壳纳米杆的制备及其光学性质[J]. *武汉大学学报(理学版)*,2009,55(5):535-

538.

FENG SH, LI J CH, FENG X L. Preparation of ZnO/ZnS core-shell nanorods and its optical properties[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 55(5): 535-538. (in Chinese)

作者简介:



赵海霞(1993—),女,吉林蛟河人,硕士研究生,主要从事半导体材料光学方面研究。E-mail: 599736811@qq.com



方铨(1983—),男,吉林吉林人,博士,副研究员,主要从事半导体材料与器件方面研究。E-mail: fangxuan110@126.com

《发光学报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号:CN 22-1116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:12-312

国外发行代号:4863BM

http://www.fgxb.org