

ZnO 纳米棒/CdS 量子点的制备及 紫外-可见探测性能研究

胡 轶^{1,2}, 胡更新², 张洁静², 桑丹丹³, 李易昆², 高世勇^{2*}

(1. 太原学院 理化系, 山西 太原 030032;

2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 聊城大学 物理科学与信息工程学院 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252000)

摘要:本文采用水热法在ITO衬底上制备了ZnO纳米棒阵列,然后用化学水浴沉积法在纳米棒上制备CdS量子点。分别利用SEM和XRD对样品形貌和晶体结构进行表征。结果表明,球状的CdS量子点均匀地包覆在ZnO纳米棒表面,且结晶质量较好。基于ZnO纳米棒和ZnO纳米棒/CdS量子点制备的探测器对紫外光都具有很好的响应,然而与ZnO纳米棒探测器相比,ZnO纳米棒/CdS量子点探测器在相同条件下的光电流提高了7倍,为0.52 mA。此外,ZnO纳米棒/CdS量子点探测器对绿光和蓝光也表现出了很好的响应。

关键词:ZnO纳米棒;CdS量子点;异质结构;紫外探测;可见光探测

中图分类号:TN36 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20191206.1271

Fabrication of ZnO nanorods/CdS quantum dots and its detection performance in UV-Visible waveband

HU Yi^{1,2}, HU Geng-xin², ZHANG Jie-jing², SANG Dan-dan³, LI Yi-kun², GAO Shi-yong^{2*}

(1. Department of Physical Chemistry, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of
Technology, Harbin 150001, China;

3. School of Physical Science and Information Technology, Shandong Key Laboratory of Optical
Communication Science and Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

* Corresponding Author, E-mail: gaoshiyong@hit.edu.cn

Abstract: ZnO nanorods were prepared on ITO substrate using the hydrothermal method and then CdS quantum dots were synthesized on the ZnO nanorods with the chemical bath deposition method. The morphologies and crystalline structure of the as-prepared samples were characterized by SEM and XRD, respectively. The

收稿日期:2019-01-29;修订日期:2019-03-03

基金项目:黑龙江省博士后基金资助项目(No. LBH-Q16104);山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2017QA013)

Supported by Postdoctoral Science Foundation of Heilongjiang Province(No. LBH-Q16104); Natural Science Foundation of Shandong Province(No. ZR2017QA013)

results indicated that after the chemical bath deposition, spherical CdS quantum dots were evenly coated on the surface of ZnO nanorods with good crystalline quality. The photodetectors made up of ZnO nanorods and ZnO nanorods/CdS quantum dots showed good response under ultraviolet (UV) irradiation. The photocurrent of ZnO nanorods/CdS quantum dots detector (0.52 mA) was 7 times higher than that of ZnO nanorods. In addition, the photodetector based on ZnO nanorods/CdS quantum dots exhibited good response to green and blue light.

Key words: ZnO nanorods; CdS quantum dots; heterostructure; UV photodetection; visible light photodetection

1 引言

近年来,光电探测器在导弹探测,环境监测以及便携式通讯等方面应用广泛,成为新的研究热点^[1-3]。特别是宽光谱光电探测器由于在紫外-可见指纹识别,双光谱图像检测等领域具有应用前景而引起了广泛关注^[4]。目前,常用于光电探测器的材料主要为宽禁带半导体材料比如 TiO₂、SnO₂、ZnO 等^[5-7]。其中,ZnO 作为一种典型的宽禁带半导体 ($E_g = 3.37$ eV), 有较大的激子束缚能,而且具有无毒无害、热稳定性高、电子迁移率高、成本低等优点,被认为是最具有发展前景的光电探测材料之一,因此在光电探测领域研究广泛^[8-9]。然而,ZnO 产生的光生电子和空穴易复合,导致其光电探测效率降低。此外,ZnO 的光吸收范围主要集中在紫外光区域,对可见光几乎无吸收,这限制了其在宽光谱探测领域的应用。

提高 ZnO 探测性能的方法有很多,如形貌调控、元素掺杂、与半导体复合等^[10-12]。将 ZnO 与不同带隙半导体复合能有效提高 ZnO 的探测性能。CdS 是一种典型的窄带隙半导体,禁带宽度约为 2.4 eV^[13],主要吸收可见光,ZnO 与 CdS 复合后可以将其吸收光谱拓宽至可见光区域,有利于实现宽光谱探测。此外,CdS 的能带结构可与 ZnO 的能带匹配,形成 II 型能带结构从而有效抑制载流子复合^[14],提高 ZnO 的探测性能。因此,CdS 被认为是与 ZnO 复合的一种理想材料。目前对 ZnO 和 CdS 复合半导体的报导已有很多,如 Ding 等人^[15]制备了核壳型 ZnO/CdS 异质结。结果表明 ZnO/CdS 异质结能促进载流子分离,且具有更高的光催化活性。Zhao 等人^[16]利用光沉积法制备了 ZnO/CdS 复合物,与 ZnO 相比,复合物

的光吸收范围扩大。Yong 等人^[17]通过两步溶液法制备出了 ZnO/CdS 核壳纳米线阵列并应用于太阳能电池。结果显示,ZnO/CdS 纳米线阵列太阳能电池的能量转换效率为 3.53%。尽管目前有很多关于 ZnO/CdS 的研究文献,但主要集中在光催化以及太阳能电池等领域,将其应用于光电探测领域的很少。

本文通过水热法在 ITO 衬底上制备了 ZnO 纳米棒阵列,然后采用化学水浴法在 ZnO 纳米棒上生长 CdS 量子点。分别在 365 nm 紫外光、470 nm 蓝光和 530 nm 绿光的照射下测试了探测器的光电探测性能,并对探测机理进行了研究。

2 实验

2.1 ZnO 纳米棒的制备

首先将 ITO 衬底依次用丙酮、无水乙醇及去离子水分别进行超声清洗 15 min,再用氮气吹干后,利用磁控溅射仪在洁净的 ITO 衬底上溅射 ZnO 种子层。然后将浓度均为 0.035 mol/L 的乙酸锌和六次甲基四胺溶液等体积混合并搅拌 10 min 后倒入反应釜中,随后将沉积有 ZnO 种子层的 ITO 衬底垂直放入反应釜。将反应釜置于 95 °C 烘箱中保温 4 h,待其冷却至室温后,将样品取出置于空气中自然风干。

2.2 ZnO 纳米棒/CdS 量子点的制备

CdS 量子点是通过化学水浴法制备所得。将 0.001 2 mol 的乙酸镉溶于 60 mL 去离子水中搅拌 10 min 后,加入 0.001 2 mol 的硫脲并搅拌均匀。把长有 ZnO 纳米棒阵列的 ITO 衬底垂直放入混合溶液中,在 60 °C 下反应 2 h。然后将样品取出,分别用乙醇和去离子水清洗样品表面,最后在空气中自然干燥。

2.3 光电探测器的制备

光电探测器是以 ZnO 纳米棒/CdS 量子点作为光阳极,铂(Pt)作为对电极,聚硫电解质作为电解质。首先将 0.641 2 g 硫单质,4.803 6 g 硫化钠和 0.149 1 g 氯化钾溶于 10 mL 水和甲醇的混合溶液(体积比为 3:7)中搅拌均匀,得到聚硫电解质溶液。然后利用热封膜进行器件封装并将聚硫电解质注入到密封区域。为了对比,在相同条件下也制备了 ZnO 纳米棒探测器。

2.4 样品表征

利用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi SU-70)对样品形貌进行表征。样品的晶体结构采用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 Advance)进行分析。用拉曼光谱仪(Jobin Yvon HR800)在常温下测得光致发光谱(PL),激发波长为 325 nm。用电化学工作站(CHI660E)测试器件在紫外光(365 nm)照射下的 I-V 特性曲线。分别使用 365 nm 紫外光,470 nm 蓝光以及 530 nm 绿光作为模拟紫外、可见光信号光源,在零偏压条件下,用电化学工作站测试器件在紫外光和可见光照射下的开/关电流。探测器的光响应谱通过光谱响应测试仪(Solar Cell Scan 100, Zolix)获得。

3 结果与讨论

图 1(a)是通过水热法制备所得 ZnO 纳米棒阵列的 SEM 图。从中可以看到高密度的 ZnO 纳米棒均匀地生长于整个 ITO 衬底上。从图 1(b)中可以看到 ZnO 纳米棒顶部呈六棱柱型,直径约为 70 nm,并且具有光滑的表面。经过化学水浴反应后其形貌如图 1(c)所示,可见,与反应前相比,ZnO 纳米棒的整体分布没有明显变化。从相应的高倍图(图 1(d))中可以看到,ZnO 纳米棒表面明显变得粗糙,并且有大量的 CdS 量子点均匀地生长在其表面,CdS 量子点呈球状。

图 2 是 ZnO 纳米棒和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点的 XRD 图。从 ZnO 纳米棒的 XRD 图谱中可以看到,除了 ITO 衬底的衍射峰外(图中用 ◆ 标出),在 31.8°处出现了较强的衍射峰,对应于六角纤锌矿型 ZnO(JCPDS No. 35-1451)的(100)晶面^[18]。此外,与 ZnO 的(002)、(101)、(102)、

(110)和(103)晶面对应的衍射峰也被观察到。由图 2 可知,ZnO 的衍射峰较窄,表明 ZnO 纳米棒的结晶质量较好。与 ZnO 纳米棒的 XRD 图谱相比,ZnO 纳米棒/CdS 量子点的 XRD 图谱中出现了 4 个新的衍射峰,分别与六方型 CdS(JCPDS No. 41-1049)的(100)、(002)、(101)和(110)晶面对应^[19]。这表明在 ZnO 纳米棒上成功地制备了 CdS 量子点。

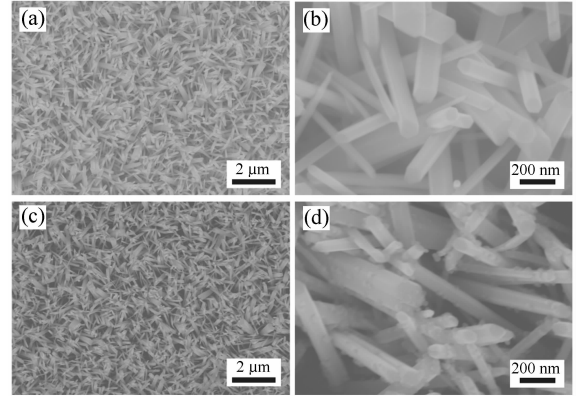


图 1 ZnO 纳米棒(a,b)和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点(c,d)的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of ZnO nanorods(a, b) and ZnO nanorods/CdS quantum dots(c, d)

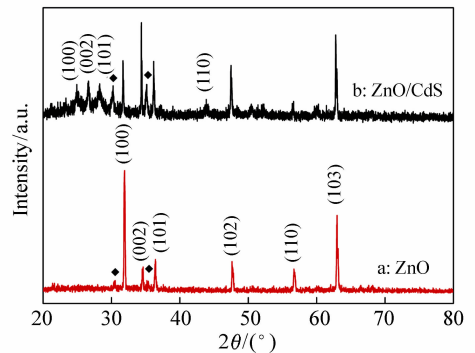


图 2 ZnO 纳米棒(a)和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of ZnO nanorods(a) and ZnO nanorods/CdS quantum dots(b)

在 365 nm 紫外光照射下,对 ZnO 纳米棒探测器以及 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的 I-V 特性曲线进行测试,结果如图 3 所示。从图中可以看到,ZnO 纳米棒探测器的开路电压和短路电流分别是 0.14 V 和 0.08 mA。与 CdS 量子点结

合之后, ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的开路电压(0.33 V)和短路电流(0.42 mA)均有所提高。

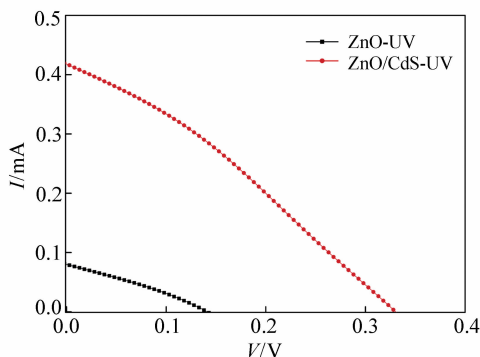


图3 ZnO 纳米棒探测器和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器在紫外光下的 I-V 特性曲线

Fig. 3 I-V characteristic curves of ZnO nanorods detector and ZnO nanorods/CdS quantum dots detector under UV illumination

图4 是所制备的 ZnO 纳米棒和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的光响应图谱。从图中可以明显看到, ZnO 纳米棒探测器对紫外光(300 ~ 400 nm)有较高的响应度, 在 370 nm 处达到最大峰值, 而器件对 400 nm 之后的光没有响应。ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器不仅对紫外光有响应, 对可见光也非常敏感, 对 300 ~ 550 nm 范围的光都有响应, 其光响应范围较 ZnO 纳米棒探测器有极大的拓宽。这表明 ZnO 与 CdS 复合后不仅能对紫外光进行探测, 对可见光也具有一定的探测能力, 能够实现宽光谱探测。

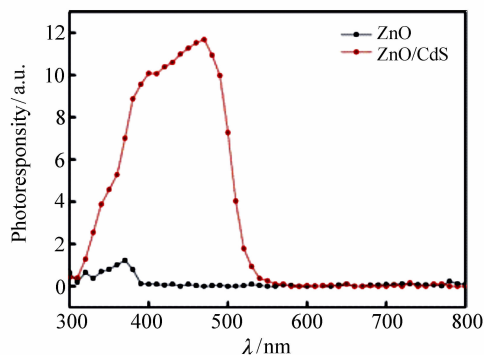


图4 ZnO 纳米棒探测器和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的光响应图谱

Fig. 4 Photoresponse spectra of ZnO nanorods detector and ZnO nanorods/CdS quantum dots detector

为了研究所制备探测器对紫外光的探测性能, 在 365 nm 紫外光的照射下, 对 ZnO 纳米棒探测器以及 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的光电流在零伏偏压下进行测试。以打开紫外光 10 s, 然后关闭紫外光 10 s 为一个周期, 探测器的光电流响应特性曲线如图 5 所示。从图 5 可以看到, 在无紫外光的条件下, ZnO 纳米棒探测器没有电流产生。当紫外光照射时, ZnO 纳米棒探测器迅速产生光电流并快速到达电流最大值(0.07 mA)。当关闭紫外光后, ZnO 纳米棒探测器的光电流迅速下降, 恢复至初始状态。经过 5 个周期测试, ZnO 纳米棒探测器的光电流表现出相同的变化规律, 这表明器件的紫外探测性能稳定。与 ZnO 纳米棒探测器相同, 在开/关紫外光条件下 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的光电流也分别快速上升和下降且经过多个周期之后性能同样稳定。值得注意的是, 与 CdS 结合后, 器件的光电流增加至 0.52 mA, 约为 ZnO 纳米棒探测器的 7 倍。

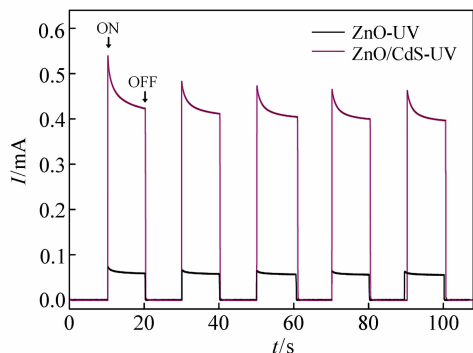


图5 ZnO 纳米棒探测器和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器在开/关紫外光下的响应特性曲线

Fig. 5 Time dependent current response curves of ZnO nanorods detector and ZnO nanorods/CdS quantum dots detector under on/off UV illumination

为进一步探究器件对可见光的探测性能, 在相同条件下, 以 470 nm 蓝光作为模拟光源对 ZnO 纳米棒探测器和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的光电性能进行测试。图 6 是 ZnO 纳米棒探测器以及 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器在开/关蓝光下的响应特性曲线图。从图中可以看到, 在暗光下无论是 ZnO 纳米棒探测器还是 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器都没有电流。在蓝光照射

下,ZnO 纳米棒探测器没有观察到明显的电流,即其对蓝光无响应。而 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器能立刻产生光电流并快速增加至最大值,然后电流逐渐减小回到一个稳定的电流值,约为 0.43 mA。当蓝光关闭后,ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的光电流迅速降低至初始状态。多次循环测试表明 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器对蓝光具有稳定的探测性能。

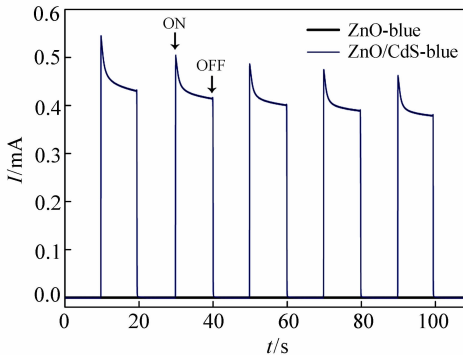


图6 ZnO 纳米棒探测器和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器分别在开/关蓝光下的响应特性曲线

Fig.6 Time dependent current response curves of ZnO nanorods detector and ZnO nanorods/CdS quantum dots detector under on/off blue light

当以 530 nm 绿光作为模拟光源时,ZnO 纳米棒探测器以及 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的光电响应结果(如图 7 所示)与蓝光下类似。ZnO 纳米棒探测器在绿光照射下几乎无电流,而 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器在绿光照射下能产生稳定光电流(0.17 mA)。且根据灵敏度^[20]的定义 $S(\%) = ((I_{ph} - I_d)/I_d) \times 100\%$ 可知,ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的灵敏度约为 31 500%。光电探测结果表明与 CdS 结合后,不仅能提高 ZnO 对紫外光的探测性能,还能使其对可见光具有探测能力,这有利于实现紫外-可见宽光谱探测。

为了研究 ZnO 纳米棒被 CdS 量子点敏化前后的光生载流子分离情况,在室温条件下对 ZnO 纳米棒以及 ZnO 纳米棒/CdS 量子点进行了 PL 谱测试,结果如图 8 所示。从图 8 可以看到,ZnO 纳米棒在 387 nm 处出现了强度较大且尖锐的紫外发光峰,该峰产生于 ZnO 材料中禁带边缘的激子复合^[21]。在 500 ~ 750 nm 内没有观察到 ZnO

纳米棒的可见发光峰,说明制备的 ZnO 中缺陷较少^[22]。值得注意的是,CdS 量子点敏化后的 ZnO 纳米棒在 387 nm 处的本征发光峰强度极大地降低了。由于光致发光峰来源于激子的直接复合,峰强降低意味着激子复合受到抑制^[23]。上述结果表明 ZnO 纳米棒/CdS 量子点能有效促进光生电子-空穴对的分离,减少光生电子-空穴对的复合。此外,还观察到 ZnO 纳米棒/CdS 量子点在 500 ~ 750 nm 范围内有较宽的发光带,该发光带来源于 CdS 的一些本征缺陷如硫空位或者表面态^[24]。

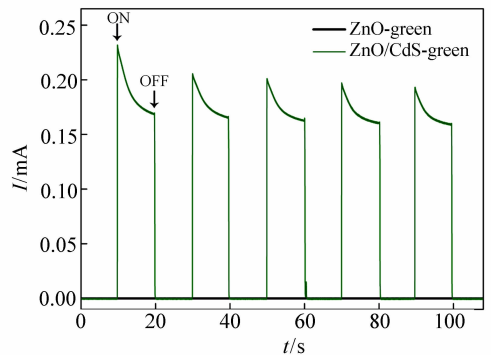


图7 ZnO 纳米棒探测器和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器分别在开/关绿光下的响应特性曲线

Fig.7 Time dependent current response curves of ZnO nanorods detector and ZnO nanorods/CdS quantum dots detector under on/off green light

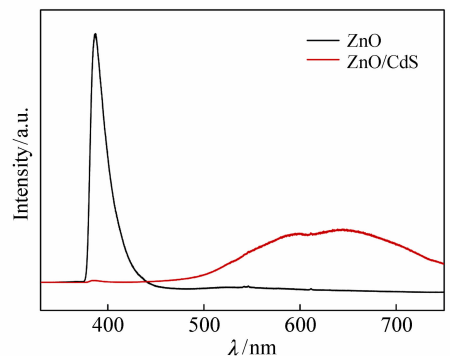


图8 ZnO 纳米棒和 ZnO 纳米棒/CdS 量子点的 PL 图谱

Fig.8 PL spectra of ZnO nanorods and ZnO nanorods/CdS quantum dots

图9是 ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的工作机理图。

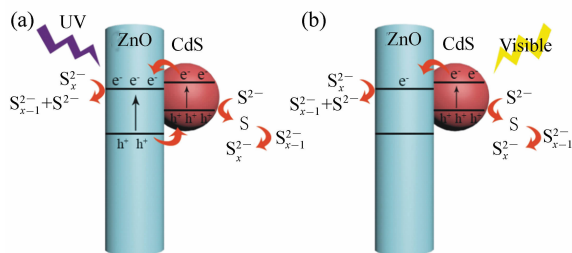
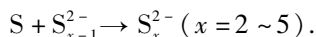
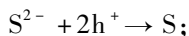


图9 ZnO纳米棒/CdS量子点在紫外光下(a)和可见光下(b)的探测机理图

Fig. 9 Schematic illustration of ZnO nanorods/CdS quantum dots detector under UV (a) and visible light (b)

当照射在 ZnO 或 CdS 表面的光子能量大于其禁带宽度时,价带上的电子就会被激发至导带,相应地在价带留下同等数目的空穴^[25]。因此在紫外光照射下,ZnO 和 CdS 价带中的电子均能吸收相应光子的能量,跃迁至导带,即在 ZnO 和 CdS 中都会产生光生电子-空穴对,如图 9(a) 所示。由于 CdS 的导带和价带电势均低于 ZnO 的导带和价带,二者结合构成 II 型能带结构后,CdS 导带中的电子会迁移至 ZnO 的导带,而 ZnO 价带中的空穴则迁移至 CdS 的价带,这就实现了光生电子-空穴的迅速分离,减小电子空穴的复合,从而使得光电流提高^[26]。然后聚集在 CdS 价带中的空穴迁移至 CdS 的表面,将聚硫电解质中的 S^{2-} 氧化成 S 单质,之后 S 单质进一步与 S_x^{2-} 反应生成 S_x^{2-} (其中 $x = 2, 3, 4, 5$)^[27]。光阳极涉及的反应方程式如下:



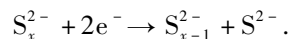
ZnO 导带中的电子则扩散至 ITO 衬底上,并通过外电路到达对电极,然后与扩散至对电极的 S_x^{2-} 反应再次生成 S^{2-} 和 S_{x-1}^{2-} ,如此循环,聚硫电解质中的 S^{2-}/S_x^{2-} 氧化还原对可以反复消耗与再

参考文献:

[1] 张吉英,蒋大勇,鞠振刚,等.用于日盲波段的 MgZnO 薄膜材料和紫外探测器[J].中国光学与应用光学,2008,1(1):80-84.

ZHANG J Y,JIANG D Y,JU ZH G,*et al.*. Mg_xZn_{1-x}O thin film and UV detector for solar-blind wavelength[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*,2008,1(1):80-84. (in Chinese)

生,重复利用^[28]。对电极涉及的反应方程式如下:



同时,由于传输到对电极的电子得到消耗而没有聚集,因此光生电子能持续通过外电路到达对电极,这样在外电路中就会有光电流产生。当关闭紫外光后,ZnO 和 CdS 均无法产生光生电子和空穴,而之前产生的电子和空穴会与电解质反应逐渐被消耗殆尽,即光电流迅速减小,恢复至初始状态,待恢复光照后便重新进入下一周期。

在可见光(蓝光、绿光)照射下,ZnO 由于禁带宽度较宽没有光生载流子的产生,因此 ZnO 纳米棒对可见光没有响应。而 CdS 在可见光照射下能产生光生电子和空穴,且在内建电场的作用下,CdS 导带中的电子会迁移到 ZnO 的导带,实现载流子分离,从而减少了光生电子-空穴的复合,如图 9(b) 所示。然后空穴会参与将 S^{2-} 氧化成 S 单质的反应,电子则通过外电路到达对电极与 S_x^{2-} 反应,从而使得外电路中产生光电流。因此,ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器对蓝光和绿光有光响应,即对可见光和紫外光均具有探测性能。

4 结 论

采用水热-化学水浴法在 ITO 上成功制备了 ZnO 纳米棒/CdS 量子点阵列。观察形貌可知,ZnO 纳米棒/CdS 量子点是由 ZnO 纳米棒和分布在其表面的 CdS 球状量子点组成的。以 Pt 作为对电极制备了紫外-可见光探测器。光电测试结果表明,在紫外光照射下,ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器的光电流增大至 0.52 mA,为 ZnO 纳米棒探测器的 7 倍。此外,ZnO 纳米棒/CdS 量子点探测器对蓝光和绿光也能快速响应,多次测试结果表明其具有良好的循环性和稳定性,能够实现紫外-可见光谱探测。

- [2] FANG Y J, DONG Q F, SHAO Y CH, *et al.*. Highly narrowband perovskite single-crystal photodetectors enabled by surface-charge recombination[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(10):679-686.
- [3] 王世涛, 张伟, 王强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3):484-491.
WANG SH T, ZHANG W, WANG Q. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):484-491. (in Chinese)
- [4] HU L, ZHU L P, HE H P, *et al.*. Colloidal chemically fabricated ZnO: Cu-based photodetector with extended UV-visible detection waveband[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(20):9577-9581.
- [5] 唐小强, 陈裕雲, 罗燕妮, 等. 基于 TiO₂ NRs@ ZnIn₂S₄ NSs 复合材料的谷胱甘肽光电化学传感器的构建与应用[J]. *分析化学*, 2019, 47(8):1188-1194.
TANG X Q, CHEN Y Y, LUO Y N, *et al.*. A novel glutathione photoelectrochemical sensor based on titanium dioxide nanorods @ ZnIn₂S₄ nanosheets nanocomposites[J]. *Chinese J. Anal. Chem.*, 2019, 47(8):1188-1194. (in Chinese)
- [6] LI X D, GAO C T, DUAN H G, *et al.*. High-performance photoelectrochemical-type self-powered UV photodetector using epitaxial TiO₂/SnO₂ branched heterojunction nanostructure[J]. *Small*, 2013, 9(11):2005-2011.
- [7] 胡轶, 徐思伟, 李想, 等. 自供能 ZnO/ZnS 异质结紫外探测器的性能研究[J]. *材料研究学报*, 2019, 33(7):523-529.
HU Y, XU S W, LI X, *et al.*. Performance of self-powered UV photodetector based on ZnO/ZnS heterojunction[J]. *Chin. J. Mater. Res.*, 2019, 33(7):523-529. (in Chinese)
- [8] 胡明江, 晋兵营. 基于 CuO/ZnO 异质结纳米花的薄膜型丙酮传感器研究[J]. *分析化学*, 2019, 47(3):363-370.
HU M J, JIN B Y. Research on film type acetone sensor based on copper oxide/zinc oxide heterostructure nanoflower[J]. *Chinese J. Anal. Chem.*, 2019, 47(3):363-370. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 宋志明, 赵东旭, 郭振, 等. ZnO 纳米线紫外探测器的制备和快速响应性能的研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(5):052901.
SONG ZH M, ZHAO D X, GUO ZH, *et al.*. Fabrication and fast photoresponse properties of ZnO nanowires photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5):052901. (in Chinese)
- [11] KHAYATIAN A, ASGAR V, RAMAZANI A, *et al.*. Diameter-controlled synthesis of ZnO nanorods on Fe-doped ZnO seed layer and enhanced photodetection performance[J]. *Materials Research Bulletin*, 2017, 94:77-84.
- [12] YAN SH K, RAI S C, ZHENG ZH, *et al.*. Piezophototronic effect enhanced UV/Visible photodetector based on ZnO/ZnSe heterostructure core/shell nanowire array and its self-powered performance[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2016, 2(12):1600242.
- [13] 陈全友, 谭学才, 杜方凯, 等. 基于 CdS 敏化 Fe:TiO₂ 纳米片的光电传感器对 Cu²⁺ 的检测[J]. *分析化学*, 2018, 46(2):232-238.
CHEN Q Y, TAN X C, DU F K, *et al.*. A photoelectrochemical sensor based on CdS sensitized Fe:TiO₂ nanosheets for determination of Cu²⁺ [J]. *Chinese J. Anal. Chem.*, 2018, 46(2):232-238. (in Chinese)
- [14] WEI R B, KUANG P Y, CHENG H, *et al.*. Plasmon-enhanced photoelectrochemical water splitting on gold NPs decorated ZnO/CdS nanotube arrays[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(5):4249-4257.
- [15] DING M, YAO N N, WANG CH G, *et al.*. ZnO@ CdS core-shell heterostructures: fabrication, enhanced photocatalytic, and photoelectrochemical performance[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2016, 11(1):205.
- [16] ZHAO H, DONG Y M, JIANG P P, *et al.*. Light-assisted preparation of a ZnO/CdS nanocomposite for enhanced photocatalytic H₂ evolution: an insight into importance of in situ generated ZnS[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2015, 3(5):969-977.
- [17] TAK Y, HONG S J, LEE J S, *et al.*. Fabrication of ZnO/CdS core/shell nanowire arrays for efficient solar energy conversion[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, 19(33):5945-5951.
- [18] SALEM M, AKIR S, MASSOUDI I, *et al.*. Photoelectrochemical and optical properties tuning of graphene-ZnO nanocom-

- posites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*,2018,767:982-987.
- [19] LI P, HOU CH CH, ZHANG X H, *et al.*. Ethylenediamine-functionalized CdS/tetra(4-carboxyphenyl) porphyrin iron (III) chloride hybrid system for enhanced CO₂ photoreduction[J]. *Applied Surface Science*,2018,459:292-299.
- [20] SELMAN A M, HASSAN Z. Highly sensitive fast-response UV photodiode fabricated from rutile TiO₂ nanorod array on silicon substrate[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*,2015,221:15-21.
- [21] KUMAR P S, RAJ A D, MANGALARAJ D, *et al.*. Hydrophobic ZnO nanostructured thin films on glass substrate by simple successive ionic layer absorption and reaction(SILAR) method[J]. *Thin Solid Films*,2010,518(24):e183-e186.
- [22] LV J P, FANG M H. Photoluminescence study of interstitial oxygen defects in ZnO nanostructures[J]. *Materials Letters*, 2018,218:18-21.
- [23] VANALAKAR S A, MALI S S, SURYAWANSHI M P, *et al.*. Photoluminescence quenching of a CdS nanoparticles/ZnO nanorods core-shell heterogeneous film and its improved photovoltaic performance[J]. *Optical Materials*,2014,37:766-772.
- [24] LAVAND A B, MALGHE Y S. Visible light photocatalytic degradation of 4-chlorophenol using C/ZnO/CdS nanocomposite[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*,2015,19(5):471-478.
- [25] KAMBLE A, SINHA B, CHUNG K, *et al.*. Facile linker free growth of CdS nanoshell on 1-D ZnO: solar cell application [J]. *Electronic Materials Letters*,2015,11(2):171-179.
- [26] LI B X, WANG Y F. Synthesis, microstructure, and photocatalysis of ZnO/CdS nano-heterostructure[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*,2011,72(10):1165-1169.
- [27] JUN H K, CAREEM M A, AROF A K. A suitable polysulfide electrolyte for CdSe quantum dot-sensitized solar cells[J]. *International Journal of Photoenergy*,2013,2013:942139.
- [28] 李陈欢,肖丹. 多硫电解质对 CdS 薄膜电池光电性能影响研究[J]. *化学研究与应用*,2010,22(8):1042-1045.
LI CH H, XIAO D. Researches on the polysulfide electrolyte effect for CdS thin film photoelectrochemical cells[J]. *Chemical Research and Application*,2010,22(8):1042-1045. (in Chinese)

作者简介:



胡轶(1982—),男,山西太原人,硕士,讲师,2012年于山西大学获得硕士学位,主要从事低维材料制备与性能方面的研究。E-mail: huyi198281@126.com



高世勇(1980—),男,山西大同人,博士,硕士生导师,2010年于吉林大学获得博士学位,主要从事宽带隙半导体材料与器件方面的研究。E-mail: gaoshiyong@hit.edu.cn