

Fabrication and Photoelectric Properties of Aligned ZnO/Cu₂O Core-Shell Heterojunction Nanowire Arrays

Jiajia Zhao, Shitong Zhou, Donghui Lv, Jiaying Guo, Danni Liu, Sasa Xu, Mengke Li*

School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning
E-mail: limk@dlut.edu.cn, *lmknwnu@sina.com

Received: Jan. 14th, 2019; accepted: Feb. 4th, 2019; published: Feb. 11th, 2019

Abstract

Aligned ZnO/Cu₂O core-shell heterostructure nanowire arrays were synthesized by electrochemical depositing process. The morphology, microstructure, chemical composition, photoluminescence, IV characteristic and photoelectric properties of the synthesized heterojunction samples were analyzed by means of various testing instruments, respectively. The results show that the depositing time and voltage are the key factors for the fabrication of ZnO/Cu₂O heterojunction arrays. The SEM images show the Cu₂O shells are comprised of single-crystalline numerous nanoparticles with a thickness of around 15 - 25 nm. Compared with the pure ZnO nanowire array, the photoluminescence intensity of the purple light peak in ZnO/Cu₂O heterojunction arrays was eliminated, but the green light peak was increased with the increase of deposition voltage and deposition time. Meanwhile, the red shift phenomenon of 20 - 30 nm is observed at the green peak. An improved photoelectric property of ZnO/Cu₂O heterojunction samples is demonstrated.

Keywords

ZnO, Cu₂O, Nano Semicondoutor, Heterostructures

取向ZnO/Cu₂O纳米异质结阵列的制备及光电特性研究

赵佳佳, 周施彤, 吕东徽, 郭佳盈, 刘丹妮, 徐飒飒, 李梦轲*

辽宁师范大学, 物理与电子技术学院, 辽宁 大连
E-mail: limk@dlut.edu.cn, *lmknwnu@sina.com

*通讯作者。

文章引用: 赵佳佳, 周施彤, 吕东徽, 郭佳盈, 刘丹妮, 徐飒飒, 李梦轲. 取向 ZnO/Cu₂O 纳米异质结阵列的制备及光电特性研究[J]. 纳米技术, 2019, 9(1): 1-9. DOI: 10.12677/nat.2019.91001

摘要

采用电化学沉积法制备了取向ZnO/Cu₂O异质结阵列。通过FESEM、XRD、XPS、PL、IV特性测试等手段对形成的纳米异质结的形貌、晶体结构、化学成份、光致发光、IV特性和光电转换特性等进行了分析讨论。结果表明, 沉积时间及沉积电压是影响制备高质量ZnO/Cu₂O核壳异质结阵列的关键因素。异质结的Cu₂O包覆层厚度约为15~25 nm, 主要由单晶纳米晶粒构成, 晶粒细致。测试发现, 相对于纯ZnO纳米线阵列, ZnO/Cu₂O异质结阵列的紫光发光峰强度有所减弱, 绿光峰强度有所增强, 且绿光峰的中心峰位还出现了20~30 nm的红移现象。同时, ZnO/Cu₂O异质结阵列还表现出了较好的光电响应特性。

关键词

ZnO, Cu₂O, 纳米半导体, 异质结

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纳米尺度 pn 结的构建是当代半导体器件制备的核心问题。目前, 制备高质量的 n 型 ZnO 纳米线已经非常容易实现, 但因 ZnO 本征缺陷引起的自补偿效应和常规 p 型掺杂杂质在 ZnO 半导体中的溶解度较低等问题, 使高效、稳定的 ZnO 同质半导体 pn 结的制备仍是一个难题[1] [2]。

近来, 人们发现, p 型窄带半导体 Cu₂O 与 n 型宽带隙 ZnO 能构成较好的异质结。ZnO 半导体具有宽带隙特性, 能吸收波长 380 nm 以下的光, 可吸收光子主要集中在紫外光区域, 在可见光区域内吸收系数很小。将它与 Cu₂O 复合构成 pn 异质结后, 利用 Cu₂O 的窄带特性, 构成的异质结在可见光到紫外范围都存在较强的光子吸收特性, 可构成光电转换效率较高的 ZnO/Cu₂O 异质结器件, 有望应用于新型太阳能电池、光电转换器件和光催化等领域[3] [4]。

针对上述问题, 本文首先采用水热合成法在 Zn 片上制备了一维的取向 ZnO 纳米线阵列, 随后, 利用电化学沉积法在 ZnO 纳米线阵列上沉积了一层纳米厚度的 p 型 Cu₂O 半导体核壳包覆层, 制备出了大面积取向一维 ZnO/Cu₂O 核壳结构纳米异质结阵列。通过 XRD、XPS、FESEM、TEM、PL、IV 和光电响应特性等测试手段对制备的纳米异质结阵列的形貌、晶体结构、化学成份、光致发光、IV 特性和光电转换特性等进行了分析, 研究结果可为开发新型 ZnO 半导体异质结器件提供实验和理论基础。

2. 实验

2.1. 一维取向 ZnO 纳米线阵列的制备

采用水热合成法, 以氨水(浓度 28%)和锌片(纯度为 99.99%, 尺寸: 4 × 4 × 0.05 cm)为反应源, 在 95℃ 的反应温度下, 将 Zn 片悬吊于在聚四氟乙烯内衬反应釜的反应溶液内, 制备了结构均匀、取向性良好的一维 ZnO 纳米线阵列。制备参数如表 1 所示, 详细实验方法可查阅本组发表的相关论文[5]。

Table 1. Experimental parameters of synthesized aligned ZnO nanowire arrays under different molar concentration and time conditions**表 1.** 不同溶液浓度和时间条件下制备取向 ZnO 纳米线阵列的实验参数

序号	生长时间(h)	溶液浓度(NH ₃ ·H ₂ O:H ₂ O) (V/V)
1	3、6、10	1:1
2	3、6、10	1:3
3	3、6、10	1:5

2.2. ZnO/Cu₂O 核壳结构异质结复合阵列的制备

以水热法制得的取向一维 ZnO 纳米线阵列为基底,采用电化学沉积法在 ZnO 纳米线表面沉积了一层 Cu₂O 包覆层,制备出 ZnO/Cu₂O 核壳结构异质结。实验中,采用的药品是 Cu(NO₃)₂·3H₂O (分析纯)和 HMTA (乌洛托品、分析纯),先将一定量的 HMTA 加入去离子水,搅拌均匀后再加入一定量的 Cu(NO₃)₂·3H₂O 继续搅拌至溶液澄清且无颗粒,过滤后备用。

沉积实验时,先将配好的沉积液倒入烧杯,利用 CHI600 型电化学工作站进行三电极沉积。沉积时,ZnO 纳米线阵列为工作电极,铂片为对电极,饱和甘汞电极作为参比电极。工作电极与对电极竖直平行放置,两电极之间间距为 2 cm,沉积液温度水浴保持为 25℃。沉积后,将样品放入去离子水里进行超声清洗,最后吹干备用。表 2 给出了不同沉积条件下,利用电化学沉积法制备 ZnO/Cu₂O 核壳结构异质结的实验参数。

Table 2. Experimental parameters of synthesized ZnO/Cu₂O heterojunctions under different conditions**表 2.** 不同实验条件下制备 ZnO/Cu₂O 核壳结构异质结的实验参数

序号	沉积溶液中 Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O 和 HMTA 的浓度(mol)	沉积时间(s)	沉积电压(V)
1	0.005 和 0.01	20	0.2、0.6、1、5
2	0.005 和 0.01	30	0.2、0.6、1、5
3	0.01 和 0.03	20	0.2、0.6、1、5
4	0.01 和 0.03	30	0.2、0.6、1、5

2.3. 取向 ZnO 纳米线阵列及 ZnO/Cu₂O 核壳结构异质结的特性分析

用场发射扫描电子显微镜(FESEM)对制备的一维 ZnO 纳米线阵列及 ZnO/Cu₂O 核壳结构异质结阵列样品进行了测试,分析了不同样品的表面形貌、微结构及生长特性;用 X 射线衍射(XRD)和 X 光电子能谱仪(XPS)对样品的晶格结构、化学成份进行了分析;以 He-Cd 激光器(325 nm)为激发光源,对样品进行了光致发光测试分析;用 4200SC 半导体特性分析仪研究比较了不同条件下制备样品的 IV 特性和在明暗条件下的光电流响应特性。

3. 结果与讨论

图 1a~图 1d 给出了不同条件下制备的一维取向 ZnO 纳米线阵列和 ZnO/Cu₂O 异质结的 SEM 图片。从图 1a 可看出,Zn 片上水热生长的 ZnO 纳米线顶部为六角状,直径约为 50~300 nm,长度约为 10~15 μm。绝大多数纳米线与 Zn 片成一个较小的角度,互相交织,直径大小也比较均匀,构成了取向性较好的一维纳米线阵列结构。单根 ZnO 纳米线表面光滑,表面和端部没有附带其它杂散颗粒。

图 1b~图 1d 为不同沉积条件下制备的 ZnO/Cu₂O 异质结的 SEM 图片。对比图 1b 和图 1c 可看出,在

溶液浓度、沉积时间相同的条件下,沉积电压为 0.2 V 时, Cu_2O 以晶粒形式主要沉积在 ZnO 纳米线的顶端,沉积晶粒逐渐呈球状长大,晶粒细腻,结晶度较好。而当沉积电压变为 0.6 V 时, Cu_2O 沉积晶粒在 ZnO 纳米线顶端和中部形成了一层核壳结构包覆层,晶粒细致,包覆层厚度约为 15~25 nm,包覆效果最好。从图 1d 可看出,随着沉积电压的增大,溶液浓度的提高,相同时间下沉积在 ZnO 纳米线上的包覆层的厚度变大,复合纳米线之间相互连接,晶粒逐渐长大。实验发现,随着沉积时间、沉积电压和溶液浓度的增大,导致 Cu_2O 晶粒的沉积速度加快,结晶度降低,易造成包覆在 ZnO 表面的 Cu_2O 晶粒形成絮状团簇,影响异质结的整体性能。通过对比实验发现,电沉积法制备 ZnO/ Cu_2O 异质结时,沉积时间为 20 s、沉积溶液为 0.005 和 0.01 mol 条件下、沉积电压为 0.6 V 时,制备的 ZnO/ Cu_2O 异质结的包覆效果较好,晶粒比较细腻,易形成较理想的 ZnO/ Cu_2O 核壳异质结阵列(如图 1c)。

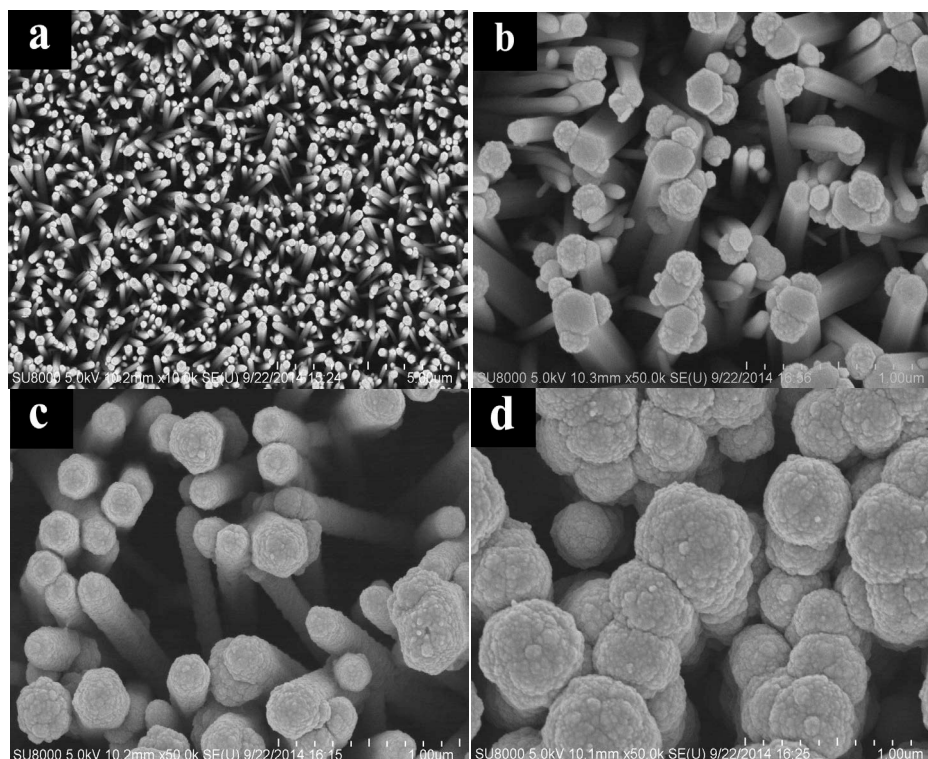


Figure 1. SEM images of the one dimension aligned ZnO nanowire arrays and the synthesized ZnO/ Cu_2O heterojunctions. (a) Plan-view of the aligned ZnO nanowire arrays with solution of $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:2$ (V/V) at 95°C for 6 h; (b), (c) SEM images of the synthesized ZnO/ Cu_2O heterojunctions as the voltage was 0.2 and 0.6 V, the deposition time was 20 s, and the molar concentration of $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ and HMTA was 0.005 and 0.01 mol, respectively; (d) the deposited voltage was 5 V, the deposition time was 20 s, and the equimolar concentrations was 0.015 and 0.03 mol, respectively

图 1. 不同条件下制备的一维取向 ZnO 纳米线阵列和 ZnO/ Cu_2O 异质结的 SEM 图。(a)取向 ZnO 纳米线阵列图,生长温度 95°C , $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}=1:2$ (V/V), 生长时间 6h; (b), (c) 沉积电压分别为 0.2 和 0.6 V, 沉积时间为 20 s, 沉积溶液浓度为 0.005 和 0.01 mol 条件下的 ZnO/ Cu_2O 异质结 SEM 图片; (d)电压为 5 V, 沉积时间为 20 s, 沉积溶液浓度为 0.015 和 0.03 mol

图 2 为对应图 1c 的电沉积法制备的 ZnO/ Cu_2O 异质结的 XRD 谱图。可看出,电沉积法所制备的 ZnO/ Cu_2O 纳米异质结阵列的 XRD 图谱在 2θ 角为 $20\sim 75^\circ$ 之间显示了多个明显的衍射峰,其中位于 $20\sim 36.58^\circ$ 处衍射峰最强。经与 PCPDFWIN 标准图谱比较发现,位于 $20\sim 32.02^\circ$ 、 34.7° 、 36.52° 等处的谱峰分别对应着 ZnO 六角纤锌矿结构(36-1451)的(100)、(002)、(101)晶面,而位于 $20\sim 36.42^\circ$ 、 42.67° 、 62.82° 、 73.1° 处的谱峰分别对应立方结构 Cu_2O (34-1354)的(111)、(200)、(220)、(311)晶面,其它谱峰图对应的晶

面也已标定。可看出, 处于 36.52° 位置处对应 $\text{Cu}_2\text{O}(111)$ 晶面的衍射峰强度最强, 这说明制备出的 Cu_2O 晶体具有沿(111)晶面择优生长趋势。

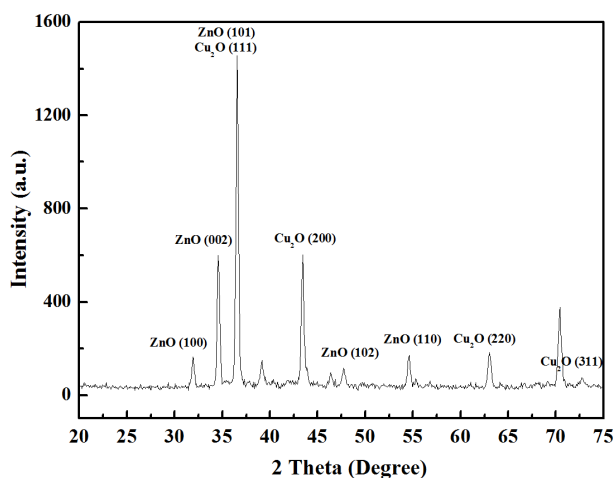


Figure 2. XRD pattern of ZnO/ Cu_2O heterojunction arrays with electrodeposition process

图 2. 电沉积法制备的 ZnO/ Cu_2O 异质结阵列的 XRD 谱图

Cu 的氧化物主要有两种半导体相, 为 CuO 或 Cu_2O 。虽然 XRD 测试分析已经证明了沉积的包覆层是 Cu_2O 单晶。但为了使测试结果更加可信, 本文还通过 XPS 技术进一步确认了沉积包覆层中 Cu 的价态。一般利用 XPS 检测 Cu_2O 成分主要检测样品的主峰 $\text{Cu } 2p_{3/2}$ 和伴峰 $\text{Cu } 2p_{1/2}$ 。其中较宽的 $\text{Cu } 2p_{3/2}$ 的主峰位于 932.8 eV 附近, 伴峰位于 $\text{Cu } 2p_{1/2}$ 位于 952.7 eV 附近。较宽的 $\text{Cu } 2p_{3/2}$ 的主峰又可分解为两个子峰, 其中一个代表 Cu_2O 或 Cu, 结合能峰值在 932 eV 附近; 另一个代表 CuO, 峰值在 935 eV 附近。根据测试结果, 就可区分沉积样品到底是 Cu_2O (或 Cu) 还是 CuO。

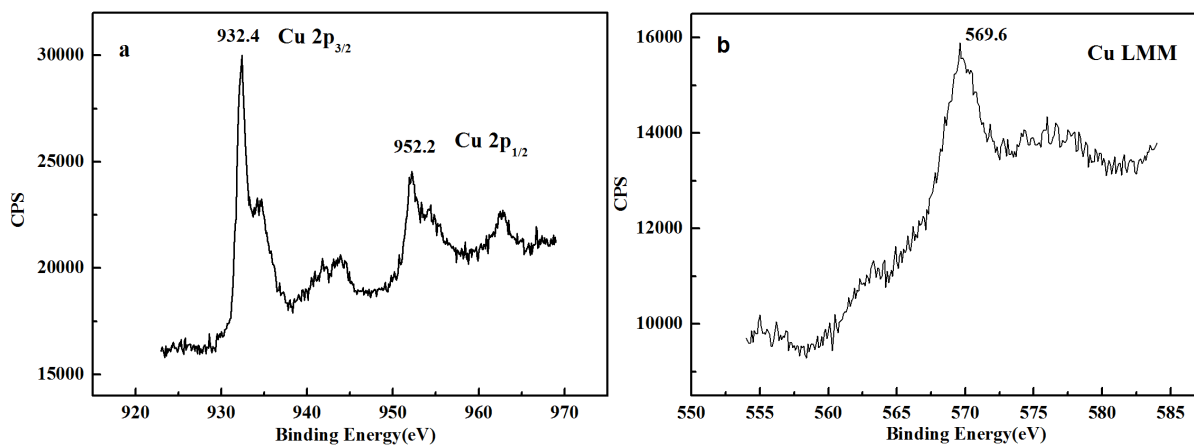


Figure 3. XPS pattern of the ZnO/ Cu_2O heterojunction samples. (a) Cu 2p; (b) the pattern of Cu LMM

图 3. ZnO/ Cu_2O 异质结样品的 XPS 谱图。(a) Cu 2p; (b) Cu LMM 的测试谱峰

如果 XPS 谱峰观测到了结合能在 932 eV 附近的谱峰, 还需进一步判定这是 Cu_2O 还是金属 Cu 的谱峰。但 Cu_2O 和金属 Cu 的结合能只差 0.1 eV, 因此, 为精确分辨到底是 Cu 还是 Cu_2O 成份, 就需要通过 XPS 中的 LMM 双俄歇跃迁技术来鉴别 Cu 和 Cu_2O 。Cu 的 LMM 双俄歇跃迁峰在 568 eV, 而 Cu_2O 的在 570 eV 位置[6]。

图 3a 和图 3b 分别给出了对应图 1c 典型样品的 Cu 2p 和 Cu LMM 测试图谱。测试发现,样品的 Cu 2p_{3/2} 的峰值为 932.4 eV, 说明样品中 Cu 元素是以 Cu₂O 或者 Cu 形式存在的。随后, 对样品的 LMM 双俄歇跃迁的结合能峰值测定结果为 569.6 eV, 与 Cu₂O 的理论上的 LMM 峰值 570 eV 非常吻合, 从而验证了包覆层中 Cu 元素是以 Cu₂O 形式存在, 最终证明了本文制备的核壳复合阵列确实是 ZnO/Cu₂O 异质结阵列。

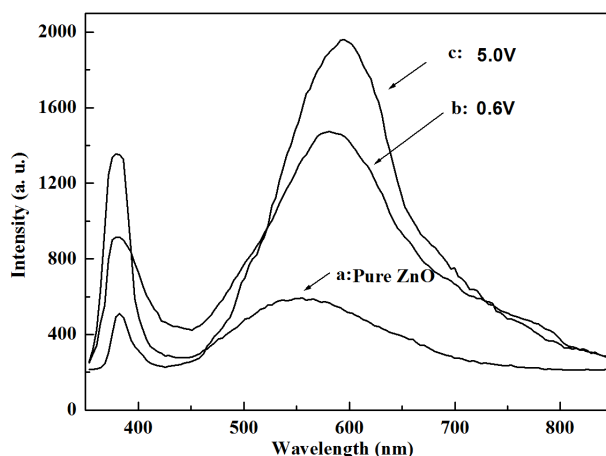


Figure 4. PL spectra of pure ZnO and ZnO/Cu₂O heterojunctions under the different depositing conditions. (a) pure ZnO nanowire array; (b) and (c) the depositing voltage was 0.6 and 5 V, the time was 20 s, and the equimolar concentrations of Cu(NO₃)₂·3H₂O and HMTA was 0.005 and 0.01 mol, respectively

图 4. 纯 ZnO 纳米线阵列和不同沉积条件下制备的 ZnO/Cu₂O 异质结的 PL 光谱。(a) 纯 ZnO 阵列; (b) 沉积电压为 0.6 V; (c) 5.0 V。沉积溶液浓度为 0.005 和 0.01 mol, 沉积时间 20 s

图 4 给出了纯 ZnO 纳米线阵列和沉积时间 20 s, 沉积溶液浓度为 0.005 和 0.01 mol, 不同沉积电压条件下制备的 ZnO/Cu₂O 异质结阵列的 PL 光谱。可看出, 与纯一维 ZnO 纳米线阵列类似, 不同条件下制备的 ZnO/Cu₂O 异质结的 PL 光谱中都存在一个位于 380.7 nm 附近的相对尖锐的紫光峰, 因 Cu₂O 半导体的禁带宽度为 2.1~2.4 eV, 因此, 该发光峰应是 ZnO 禁带边的激子复合发光造成的。同时, ZnO 纳米线阵列和 ZnO/Cu₂O 异质结阵列都存在处于 557.7 nm 附近的绿光峰, 这主要是 ZnO 中 O 和 Zn 的空位及 Zn 的填隙原子等缺陷造成的。比较图 4a-c 可看出, 随着沉积电压的增大, 相对于纯 ZnO 纳米线阵列, ZnO/Cu₂O 异质结阵列的紫光峰发光强度逐渐减弱, 绿光峰强度逐渐增强。同时, 随着沉积电压的加大, 相同的时间内, 因包覆层厚度有所增厚, ZnO/Cu₂O 异质结阵列绿光峰的中心都出现了 20~30 nm 的红移现象, 且沉积电压越大, 红移越明显。分析认为, 随着沉积电压的增大, 沉积的窄带 Cu₂O 半导体包覆层逐渐覆盖了 ZnO 纳米线的表面, 使其表面态分布密度增大, 导致 ZnO 的缺陷及杂质能级间隔变窄, 缺陷及杂质能级中的跃迁电子更容易驰豫到表面, 跃迁辐射能量小的光子分布增多, 最终导致其绿光发光峰强度随之变大且中心峰位出现了红移现象[7]。而紫光峰强度逐渐下降的原因主要是随着沉积电压的提高, Cu₂O 晶粒逐渐包覆在 ZnO 纳米线表面, 使其表面态密度增大, 造成 ZnO 中的电子更容易以无辐射跃迁的途径释放能量, 最终导致禁带边跃迁几率变小所致[8]。同时, 随沉积电压的增加, ZnO 纳米线表面沉积的 Cu₂O 包覆层逐渐增厚, 也会屏蔽一部分禁带边辐射跃迁光子溢出 ZnO, 从而导致紫光峰强度降低。

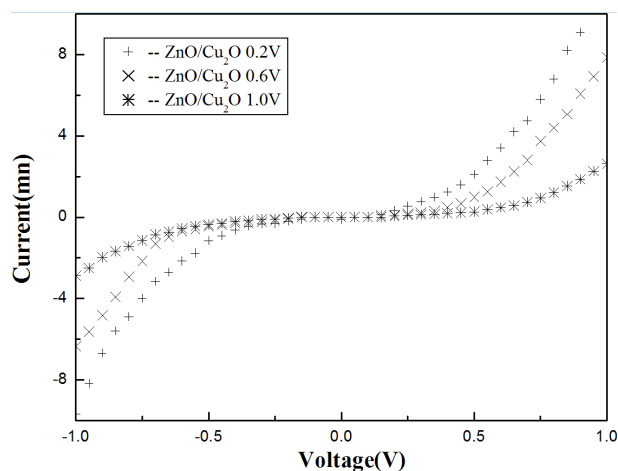


Figure 5. IV curves of the synthesized ZnO/Cu₂O heterojunction arrays

图 5. ZnO/Cu₂O 异质结阵列的 IV 特性曲线

图 5 给出了沉积时间为 20 s、溶剂浓度为 0.005 和 0.01 mol，沉积电压分别为 0.2、0.6、1.0 V 条件下制备的 ZnO/Cu₂O 异质结的 IV 特性曲线。从该测试曲线中可看出，器件在正反偏压下，异质结的 IV 曲线呈现了规则对称分布特性，类似于两个背对背的二极管。无论是外加正向还是反向偏压，随着外加电压的增加，流过异质结的电流也随之增加，且 IV 特性表现出明显的肖特基整流特性。沉积电压较小的样品，电压控制电流效应较明显。由此可知，采用电化学沉积法，在 n-ZnO 纳米线表面包覆的 Cu₂O 膜层确是 p 型半导体。

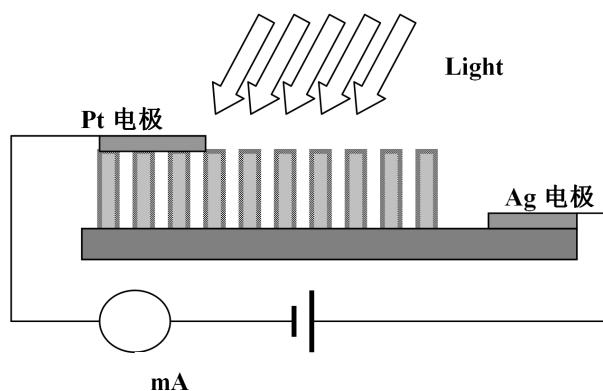


Figure 6. The schematic diagram of photoelectric characteristic testing for the ZnO/Cu₂O heterojunction array devices

图 6. ZnO/Cu₂O 纳米异质结阵列光电特性测试原理图

为了研究制备的 ZnO/Cu₂O 异质结阵列的光电特性，采用了图 6 的测试电路进行测试。测试中，在 ZnO/Cu₂O 异质结阵列样品上蒸镀了梳状 Pt 电极，在 Zn 基底上用 Ag 导电胶连接另一个电极，光源采用波长 514 nm，功率密度 50 μW/cm² 的 Ar 离子激光器，样品外加偏压范围 0.0~1.0 V，对样品进行明暗光电流特性及光电响应特性测试。

图 7 给出了沉积时间为 20 s、沉积溶液溶剂浓度为 0.005 和 0.01 mol，不同沉积电压条件下制备的 ZnO/Cu₂O 异质结的明暗光电流特性曲线。测试发现，异质结阵列对光源照射均表现出了较高的光电效应灵敏度。随着光源的开启，光电流迅速增大，0.5 s 左右后，光电流就可达到稳定。随着沉积电压的增加，

明暗电流差值变化逐渐减小。在正偏压为 1 V 时, 0.2 V、0.6 V、1.0 V 沉积电压下制备样品的明暗光电流平均差值分别为 5.03、0.90 和 0.02 μA , 可见过高沉积电压条件下制备的样品光电响应性能并不好。光电流的产生主要是光照下产生的光生电子空穴对和 ZnO/Cu₂O 异质结接触面形成的大量缺陷及杂质能级中的电子的跃迁、驰豫及分离[9]。测试结果表明, 采用电沉积法制备 ZnO/Cu₂O 异质结时, 只有当沉积时间和电压适中的条件下, 包覆在 ZnO 纳米线表面的 Cu₂O 核壳包覆层晶化程度较高, 样品表现出了较好的光电响应特性。而沉积时间过长、电压过高将会导致 Cu₂O 沉积速度过快, 沉积颗粒晶化程度不高, 核壳包覆层过厚, 最终会造成异质结表面缺陷过多, 器件内阻较大, 均不利于光电特性的提高。

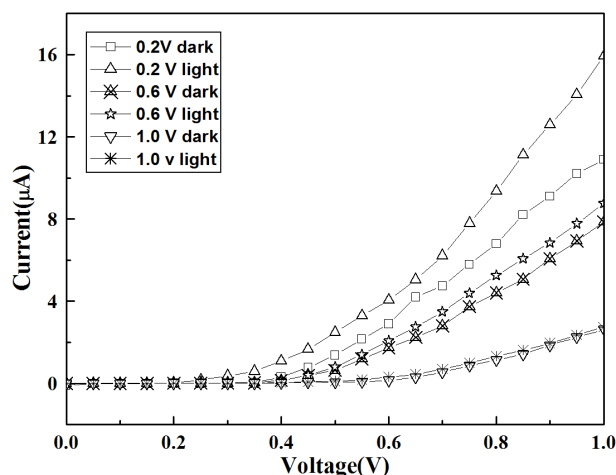


Figure 7. The photoresponse characteristics of the ZnO/Cu₂O heterojunction array devices under illumination and dark conditions with the deposition voltage was 0.2, 0.6, and 1.0 V respectively

图 7. 0.2、0.6、1.0 V 沉积电压条件下制备出的异质结阵列的明、暗光电流测试曲线

4. 结论

利用电化学沉积法, 在水热法制备的 ZnO 纳米线上沉积了一层 Cu₂O 包覆层, 制备出了核壳结构的 ZnO/Cu₂O 纳米异质结阵列。分析发现, 在沉积电压为 0.2~0.6 V, 溶液浓度不太高的条件下, 包覆层由单晶纳米晶粒构成, 晶粒细致, 包覆层厚度约为 15~25 nm, 包覆效果较好。随着沉积电压的增大, 沉积在 ZnO 纳米线表面的 Cu₂O 半导体颗粒增多, 异质结接触面上由生长缺陷及杂质能级形成的较窄能级的态密度增大, 相对于纯 ZnO 纳米线阵列, ZnO/Cu₂O 异质结阵列的紫光峰强度逐渐下降, 绿光峰强度逐渐增强, 且其中心峰位还出现了 20~30 nm 的红移。测试还发现, 较低沉积电压下制备的 ZnO/Cu₂O 异质结阵列表现出了明显的光电响应特性。

基金项目

本项目受到国家自然科学基金资助项目(No. 61076104)和辽宁省自然科学基金重点项目资助(No. 2017523)。

参考文献

- [1] Diao, K.D., Xiao, J., Zheng, Z. and Cui, X.D. (2018) Enhanced Sensing Performance and Mechanism of CuO Nanoparticle-Loaded ZnO Nanowires: Comparison with ZnO-CuO Core-Shell Nanowires. *Applied Surface Science*, **459**, 630-638. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.07.112>
- [2] Kim, K., Song, Y.-W., Chang, S., Kim, I.-H. and Lee, S.Y. (2009) Fabrication and Characterization of Ga-Doped ZnO

- Nanowire Gas Sensor for the Detection of CO. *Thin Solid Films*, **518**, 1190-1193.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.229>
- [3] Wang, R.-C. and Lin, H.-Y. (2010) Simple Fabrication and Improved Photoresponse of ZnO-Cu₂O Core-Shell Heterojunction Nanorod Arrays. *Sensors and Actuators B*, **149**, 94-97. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.06.025>
- [4] Perng, D.-C., Chen, J.-W., Kao, T.-T. and Chang, R.-P. (2013) Cu₂O Growth Characteristics on an Array of ZnO Nanorods for the Nano-Structured Solar Cells. *Surface & Coatings Technology*, **231**, 261-266.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.054>
- [5] Zhang, J., Li, M.K., Yu, L.Y., Liu, L., Zhang, L.H. and Yang, Z. (2009) Synthesis and Piezoelectric Properties of Well-Aligned ZnO Nanowire Arrays via a Simple Solution-Phase Approach. *Applied Physics A*, **97**, 869-876.
<https://doi.org/10.1007/s00339-009-5348-2>
- [6] Espinos, J.P., Morales, J., Barranco, A., Caballero, A., Holgado, J.P. and Gonzalez-Elipe, A.R. (2002) Interface Effects for Cu, CuO, and Cu₂O Deposited on SiO₂ and ZrO₂. XPS Determination of the Valence State of Copper in Cu/SiO₂ and Cu/ZrO₂ Catalysts. *The Journal of Physical Chemistry B*, **106**, 6921-6929. <https://doi.org/10.1021/jp014618m>
- [7] Perng, D.C., Chen, J.W. and Kao, T.T. (2013) Cu₂O Growth Characteristics on an Array of ZnO Nanorods for the Nano-Structured Solar Cells. *Surface & Coatings Technology*, **231**, 261-266.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.054>
- [8] Cheng, K., Li, Q.Q., Meng, J., Han, X., Wu, Y.Q., Wang, S.J., Qian, L. and Du, Z.L. (2013) Interface Engineering for Efficient Charge Collection in Cu₂O/ZnO Heterojunction Solarcells with Ordered ZnO Cavity-Like Nanopatterns. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **116**, 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.021>
- [9] Hsueh, H.T., Chang, S.J., Hung, F.Y., Weng, W.Y., Hsu, C.L., Hsueh, T.J., Tsai, T.Y. and Dai, B.T. (2011) Fabrication of Coaxial p-Cu₂O/n-ZnO Nanowire Photodiodes. *Superlattices and Microstructures*, **49**, 52-580.
<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2011.03.011>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-086X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: nat@hanspub.org