

ZnO 纳米墙的电化学沉积法制备及紫外探测性能分析

商世广^{1*}, 高浪^{1**}, 任卫², 张文倩¹, 王睿¹¹西安邮电大学工程学院, 陕西 西安 710121;²西安邮电大学理学院, 陕西 西安 710121

摘要 以硝酸锌水溶液作为电沉积液, 采用电化学沉积法制备了氧化锌(ZnO)纳米墙, 研究了沉积电压对其表面形貌、晶体结构、拉曼光谱、光致发光谱、透过率以及紫外探测性能的影响。实验结果表明, 该方法制备的 ZnO 纳米墙的均匀性较好, 具有纤锌矿结构, 沿(002)晶面择优生长, 有较明显的 E_2 (high) 模峰, 在 394 nm 处有较强烈的紫外激发峰。紫外探测实验表明: 在紫外光照射下, ZnO 纳米墙的光电流迅速达到饱和, 当沉积电压为 1.6 V 时, ZnO 纳米墙的光电流值最大, 对应的响应时间和恢复时间分别为 1.36 s 和 2.23 s; 当测试偏压为 5 V 时, 光暗电流比为 38.96, 光电响应度为 0.611 A/W。

关键词 材料; 纳米材料; ZnO; 纳米墙; 电化学沉积; 紫外探测

中图分类号 O484.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0716001

Fabrication of ZnO Nanowalls by Electrochemical Deposition and Ultraviolet Detection Performance

Shang Shiguang^{1*}, Gao Lang^{1**}, Ren Wei², Zhang Wenqian¹, Wang Rui¹¹College of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;²College of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China

Abstract In the paper, zinc nitrate aqueous solution is used as electrodeposition solution to prepare zinc oxide (ZnO) nanowalls by the electrochemical deposition method. The effects of deposition voltage on the surface morphology, crystalline structure, Raman spectrum, photoluminescence spectrum, transmittance and ultraviolet detection performance are investigated. The experimental results show that the ZnO nanowalls fabricated by the proposed method have rather good uniformity, exhibit a wurtzite structure, grow preferentially along the (002) crystal plane, and have an obvious E_2 (high) mode peak. In addition, the ZnO nanowalls have a strong ultraviolet excitation peak at 394 nm. The ultraviolet detection experiments show that the photocurrent of ZnO nanowalls quickly reaches saturation under the irradiation of ultraviolet light and has the maximum value at the deposition voltage of 1.6 V. The corresponding response time and recovery time are 1.36 s and 2.23 s, respectively. The photo-to-dark current ratio is 38.96 and the photoelectric responsivity is 0.611 A/W at the bias voltage of 5 V.

Key words materials; nanomaterials; ZnO; nanowalls; electrochemical deposition; UV detection

OCIS codes 160.4236; 040.7190; 240.0310

1 引言

氧化锌(ZnO)是一种重要的 II-VI 族宽禁带半导体材料, 在室温下的禁带宽度为 3.37 eV, 具有较高的激子束缚能(60 meV)^[1], 是制备透明导电

层^[2]、湿敏传感器^[3]和声表面波传感器(SAW)^[4]的优选材料。近年来, 低维结构的 ZnO 材料得到了较多的关注。二维结构的 ZnO 纳米墙具有高的表面积和高的电子迁移率, 被广泛应用于气敏传感器^[5]和太阳能电池^[6]中, 且具有强的反射和散

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-10-28; 录用日期: 2020-11-11

* E-mail: shangshiguang05@163.com; ** E-mail: 18220201050@163.com

射特性^[7],是制备紫外探测器的优选材料^[8-10]。常见 ZnO 纳米墙的制备方法主要有金属有机气相沉积法^[11]、热蒸发法^[12]和低温水热法^[13],关于 ZnO 纳米墙的电化学沉积法制备及其性能研究鲜有报道。金属有机气相沉积法成本较高,部分反应物易燃易爆或有毒性;热蒸发法工艺简单,但薄膜表面粗糙度较大,成膜质量较差;低温水热法成本低,反应条件温和,但是不能精确控制反应容器内的实际温度。相比金属有机气相沉积等方法,电化学沉积法成本低廉,设备简单,操作方便,且可控性强,容易在衬底上大面积均匀沉积成膜^[14]。因此使用电化学沉积法制备高质量的 ZnO 纳米墙具有重要的意义。本文选用电化学沉积法制备

ZnO 纳米墙,重点研究了沉积电压的大小对 ZnO 纳米墙微观形貌、结构、光学特性及紫外光探测性能的影响。

2 实 验

2.1 电极的制备

通过射频磁控溅射仪在石英衬底上沉积 Al 导电层,沉积结束后将样品取出并放入马弗炉中,在 450 °C 条件下退火 2 h 以形成 Al₂O₃ 缓冲层,然后在沉积有 Al₂O₃ 缓冲层的石英衬底上沉积 Ti 导电层。沉积后选用半导体激光划片机绘制电极,图 1 为电极示意图,电极面积为 18 mm × 16 mm,沟道宽度约为 50 μm。

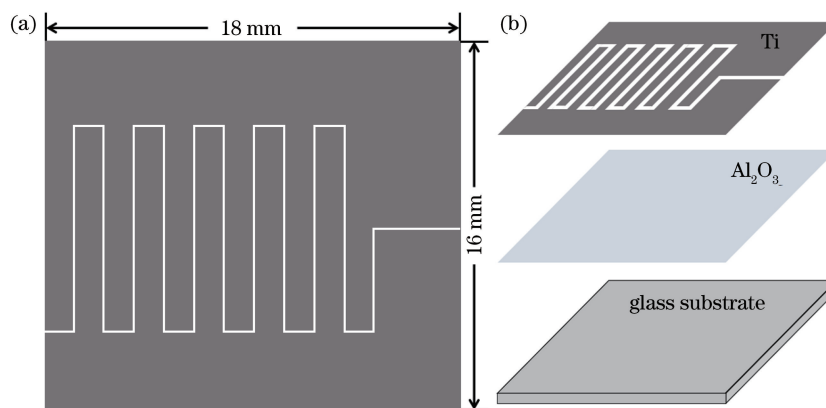


图 1 电极示意图。(a)电极俯视图;(b)电极分层结构示意图

Fig. 1 Schematic of electrode. (a) Top view of electrode; (b) schematic of electrode layered structure

2.2 ZnO 纳米墙的制备

利用磁控溅射在氧化铟锡 (Indium Tin Oxides, ITO) 玻璃衬底上沉积 ZnO 籽晶层,设置磁控溅射功率为 120 W、工作气体压强为 1.0 Pa、沉积时间为 10 min,沉积后将样品置于马弗炉中,在大气条件下 450 °C 退火处理 2 h 得到 ZnO 籽晶层,籽晶层厚度为 40~60 nm。带有 ZnO 籽晶层的 ITO 衬底作为阴极、碳棒作为阳极,被浸入到浓度为 0.075 mol/L 的硝酸锌水溶液中,恒温水浴 60 °C 磁力搅拌;直流稳压电源在碳棒、ITO 衬底两端分别加上 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 V 的沉积电压,沉积反应 5 h。待反应结束后,取出样品,用去离子水冲洗并用氮气吹干,置于马弗炉中在大气条件下 500 °C 退火处理 3 h,得到 ZnO 纳米墙并测试其相关特性。利用相同的工艺参数在电极上制备 ZnO 纳米墙,得到 ZnO 纳米墙紫外探测器并测试其光电特性,这里的 ZnO 籽晶层及 ZnO 纳米墙不进行退火处理,避免电极表面 Ti 导电层的氧化现象。

2.3 表征分析

采用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱分析仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD)、拉曼光谱仪 (Raman)、荧光光谱仪 (FS)、紫外-可见分光光度计 (UV-Vis) 对 ZnO 纳米墙的相关特性进行测试分析。通过多通道电化学工作站和数字源表测试 ZnO 纳米墙的光电特性曲线及电流 (*I*)-电压 (*V*) 特性曲线。

3 结果与讨论

3.1 SEM 分析

不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙的 SEM 图及其 EDS 图谱如图 2 所示。如图 2(a)~(e) 所示,二维片状 ZnO 纳米墙垂直于衬底,呈多孔结构,片层厚度均小于 100 nm。当沉积电压为 1.4 V 时, ZnO 纳米墙无法得到有效生长,且多孔结构呈现不均匀现象,如图 2(a) 所示。当沉积电压增大为 1.6 V 和 1.8 V 时, ZnO 纳米墙垂直生长,形成结构致密、均一

的多孔结构,如图 2(b)、(c)所示。当沉积电压增大为 2.0 V 和 2.2 V 时,ZnO 纳米墙出现坍塌现象,如图 2(d)、(e)所示。图 2(f)为沉积电压为 1.6 V 时 ZnO 纳

米墙的 EDS 图谱,其中 Zn 和 O 的原子数分数分别为 52.58%和 47.42%,不包含其他元素。结果表明,ZnO 纳米墙无其他杂质,且存在氧空位。

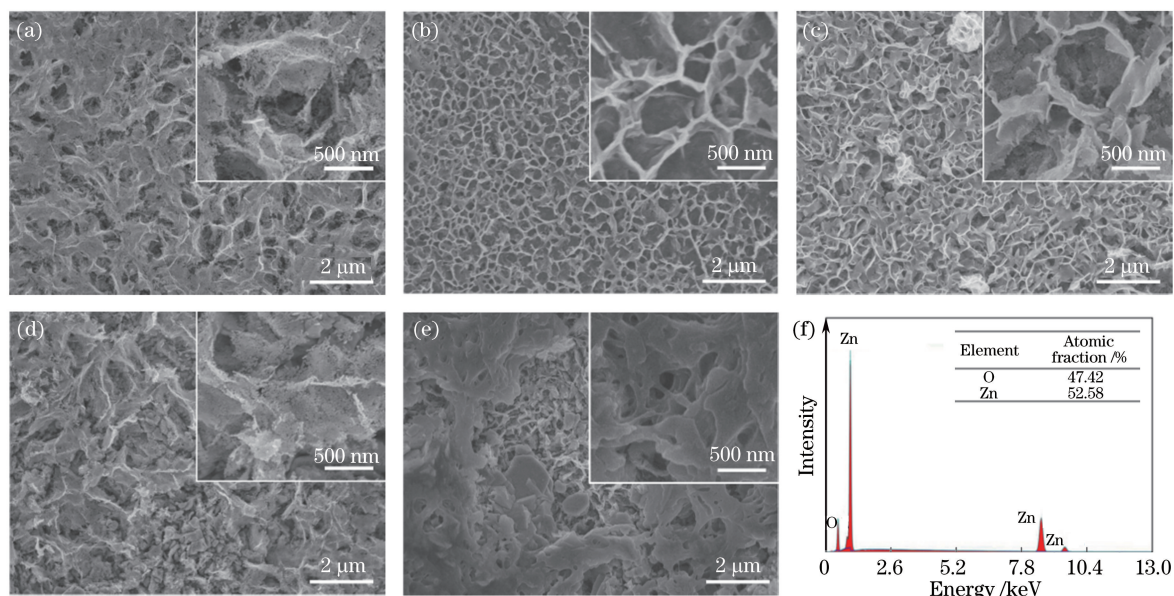


图 2 不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙 SEM 图和沉积电压为 1.6 V 时的 ZnO 纳米墙 EDS 图。

(a) 1.4 V; (b) 1.6 V; (c) 1.8 V; (d) 2.0 V; (e) 2.2 V; (f) EDS 图

Fig. 2 SEM images of ZnO nanowalls grown at different deposition voltages and EDS spectrum of ZnO nanowalls grown at deposition voltage of 1.6 V. (a) 1.4 V; (b) 1.6 V; (c) 1.8 V; (d) 2.0 V; (e) 2.2 V; (f) EDS spectrum

3.2 XRD 分析

图 3 为不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙的 XRD 图谱。从图 3 可以看出,ZnO 纳米墙为六角纤锌矿结构,与氧化锌标准谱图(JCPDS No. 79-0206)的衍射峰一致,没有观察到其他如 ZnO_2 或 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 的杂质特征峰,说明制备的 ZnO 纳米墙纯度高。在衍射角 2θ 为 31.7° 、 34.4° 和 36.2° 处,发现了对应六角纤锌矿结构氧化锌(100)、(002)、(101)的衍射特征峰^[15],还有一些强度相对较弱的衍射峰,如(102)和(103)。该结果表明,ZnO 纳米墙是沿着(002)晶面择优生长的,但衍射峰会随着沉积电压的变化而变化。当沉积电压由 1.4 V 增大到 1.6 V 时,(002)晶面衍射峰强度增大,(100)、(101)晶面衍射峰强度减小;随着沉积电压由 1.8 V 增加到 2.2 V 时,(100)、(101)晶面衍射峰强度增大,说明 ZnO 纳米墙的取向度降低。

3.3 拉曼光谱分析

图 4 为不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙的拉曼光谱,其范围为 $300\sim 750\text{ cm}^{-1}$ 。波数为 330, 378, 438, 574 cm^{-1} 处的峰,分别对应 ZnO 的 $E_2(\text{high})-E_2(\text{low})$, $A_1(\text{TO})$, $E_2(\text{high})$ 和 $A_1(\text{LO})$ 振动模式(TO 表示横光学,LO 表示纵光学),这些拉

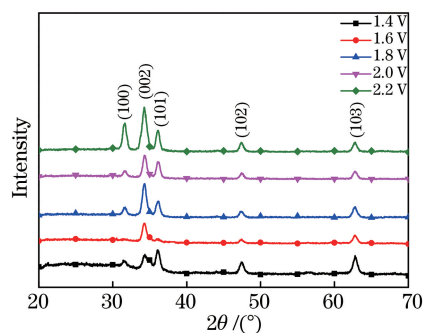


图 3 不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of ZnO nanowalls grown at different deposition voltages

曼峰符合六角纤锌矿结构 ZnO 的特征^[16]。其中,位于 330 cm^{-1} 处的 $E_2(\text{high})-E_2(\text{low})$ 模对应多声子散射过程^[17],位于 378 cm^{-1} 处的 $A_1(\text{TO})$ 模属于二阶拉曼光谱,来自氧化锌的区界声子。位于 438 cm^{-1} 处的 $E_2(\text{high})$ 模由氧原子的振动模式引起^[18],位于 574 cm^{-1} 处的 $A_1(\text{LO})$ 模则与氧空位有关^[19]。随着沉积电压的增大, $E_2(\text{high})$ 声子模式峰值呈现先增大后减小的趋势,当沉积电压为 1.6 V 时,ZnO 纳米墙的 $E_2(\text{high})$ 声子模式峰值相对最大,说明其结晶质量相对最好。

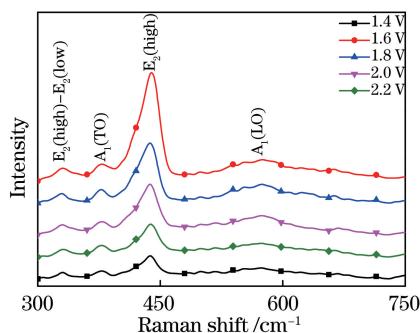


图 4 不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙的拉曼光谱
Fig. 4 Raman spectra of ZnO nanowalls grown at different deposition voltages

3.4 光致发光分析

图 5 为不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙在室温下的光致发光谱, 激发光波长为 325 nm。从图 5 中可以看出, ZnO 纳米墙的光致发光谱主要有三个发射峰: 394 nm 处的强紫外发射峰, 440~500 nm 范围内的可见光发射带和 562 nm 处的绿色发射峰。其中 394 nm 处的强紫外光来自于氧化锌的近带边发射, 由激子发光引起, 对应自由激子的辐射复合^[20-21]; 440~500 nm 范围内的可见光发射带以及 562 nm 处的绿色发射峰又称为深能级发射峰, 通常由晶体缺陷引起, 如锌间隙和氧空位^[22]。一般而言, ZnO 的紫外发光强度与可见光发光强度的比值越大, ZnO 的缺陷越少, 结晶质量越高^[20]。比较可得, 当沉积电压为 1.6 V 时, ZnO 纳米墙的紫外发光强度与可见光发光强度的比值相对最大, 这是因为当沉积电压由 1.4 V 增大至 1.6 V、1.8 V 后, 二维多孔结构的 ZnO 纳米墙的致密度得到有效提高, 均一性得到有效改善, 光致发光的光源进入 ZnO 纳米墙的多孔结构后, 在互连的纳米墙形成的闭环腔中继续循环, 光子振荡过程提高了紫外发射性能^[23], 紫外发光强度与可见光发光强度的比值增大; 沉积电压继续增大至 2.0 V、2.2 V 后, ZnO 纳米墙出现坍塌现象, 多孔结构被破坏, 光子振荡程度减弱, 紫外发射性能降低, 紫外发光强度与可见光发光强度的比值减小。因此, 当沉积电压为 1.6 V 时, ZnO 纳米墙的缺陷浓度相对较低, 结晶质量较高。

3.5 透过率分析

图 6 为 ZnO 籽晶衬底及在其表面生长的 ZnO 纳米墙的透过率曲线。从图 6 中可以看出, ZnO 籽晶衬底的截止波长约为 297 nm, 而 ZnO 纳米墙的截止波长在 380 nm 附近。在可见光区和红外光区, ZnO 籽晶衬底的最大透过率为 89.5%, 而当沉

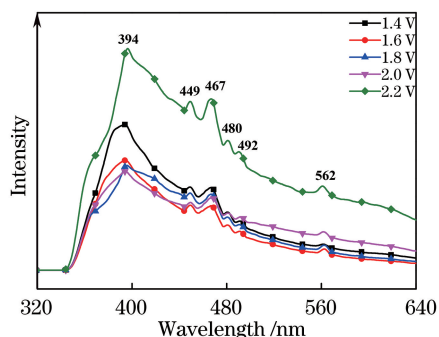


图 5 不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙的光致发光谱
Fig. 5 Photoluminescence spectra of ZnO nanowalls grown at different deposition voltages

积电压为 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 V 时, ZnO 纳米墙的最高透过率分别为 19.02%、2.1%、9.29%、9.94% 和 12.49%, 相比 ZnO 籽晶衬底, 透过率明显降低。该结果表明, ZnO 纳米墙结构可有效降低可见光的反射率并提高紫外光的吸收率, 当沉积电压为 1.6 V 时, ZnO 纳米墙结构致密、均一, 结晶度高, 更有利于紫外光的吸收。

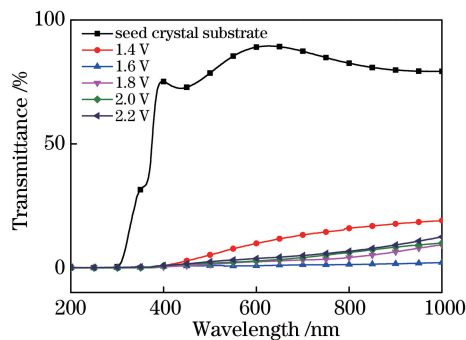


图 6 ZnO 纳米墙及籽晶衬底的透射图谱
Fig. 6 Transmittance spectra of ZnO nanowalls and seed crystal substrate

3.6 光电性能分析

图 7 为 ZnO 纳米墙的光电性能测试曲线。在 5 mW/cm² 紫外光照射下, 当施加偏压为 0 时, ZnO 纳米墙的光电流随时间的变化曲线如图 7(a) 所示, 紫外光主峰波长约为 375 nm, 开关光源时间间隔为 15 s。从图 7(a) 中可以看出, 在紫外光照射下, ZnO 纳米墙的光电流在 15 s 的时间范围内均能达到饱和值, 当沉积电压为 1.6 V 时, 样品的光电流值最高, 灵敏度最大, 对应的响应时间和恢复时间分别为 1.36 s 和 2.23 s [图 7(b)]。由图 7(c) 可以看出, 随着沉积电压的增加, ZnO 纳米墙的响应时间和恢复时间先增加后减少。当沉积电压为 1.6 V 时, ZnO 纳米墙分别在暗场及紫外光照射下的 I-V 特性曲线如图 8(a) 所示。当偏置电压为 5 V 时, ZnO 纳米

墙的暗电流和光电流分别为 1.907×10^{-4} A 和 7.62×10^{-3} A, 经计算可得 ZnO 纳米墙的光暗电流比为 38.96, 光电响应度为 0.611 A/W。不同沉积电压下生长的 ZnO 纳米墙在 ± 5 V 条件下的光暗电流比如图 8(b) 所示, 可以看出, 随着沉积电压的增加, ZnO 纳米墙的光暗电流比呈先升高后降低的趋势。

根据 ZnO 纳米墙相关特性的分析总结, 可以对沉积电压为 1.6 V 时 ZnO 纳米墙光电性能较佳的原因进行解释。一方面, 当 ZnO 纳米墙结构稀疏、致密程度低时, ZnO 纳米墙比表面积小, 电子的运动受阻, 响应度较低; 当 ZnO 纳米墙结构致密、均一时, ZnO 纳米墙比表面积较大, 响应度较高^[24]。另

一方面, ZnO 纳米墙中的缺陷会在能带的禁带中产生缺陷能级, 形成载流子复合中心, 促进光生载流子的复合, 抑制光电流的增加, 从而降低 ZnO 纳米墙的响应度; 缺陷还会捕获自由载流子, 增强对光电流的增益抑制, 增加响应时间。此外, 散射衰减也是影响发射率的重要因素, 本文中的 ZnO 纳米墙由长、宽均为几百纳米的晶片组成, 紫外光入射波长为 375 nm, 粒子的尺寸与入射光波长相当, 因此 ZnO 纳米墙在此波长处的散射机制为 Mie 散射^[25], 而具有较大比表面积的片状结构使得 ZnO 纳米墙对光的散射更为强烈, 发射率更高。当沉积电压为 1.6 V 时, 生长的 ZnO 纳米墙尺寸小, 结构致密, 比表面积较大, 缺陷浓度较低, 因而具有较佳的光电性能。

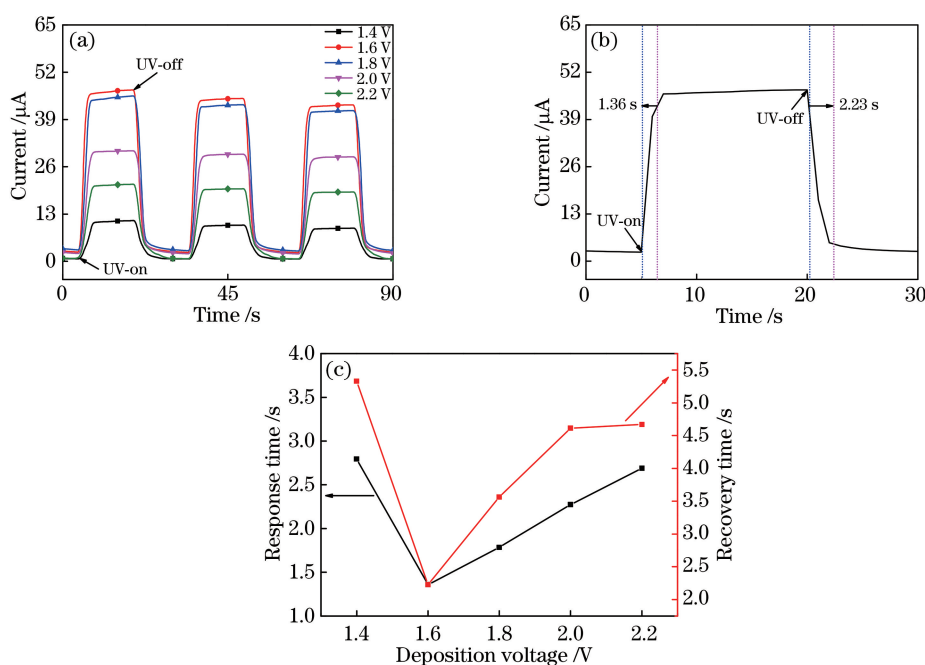


图 7 ZnO 纳米墙的紫外光响应特性图。(a) ZnO 纳米墙的紫外光响应曲线;(b)沉积电压为 1.6 V 时 ZnO 纳米墙的响应恢复曲线;(c) ZnO 纳米墙的紫外光响应/恢复时间随沉积电压的变化

Fig. 7 Ultraviolet response characteristic diagrams of ZnO nanowalls. (a) UV response curves of ZnO nanowalls; (b) response and recovery curve of ZnO nanowalls at deposition voltage of 1.6 V; (c) UV response and recovery time of ZnO nanowalls versus deposition voltage

4 结 论

采用电化学沉积法, 在 ITO 玻璃衬底上生长出 ZnO 纳米墙, 研究了不同沉积电压对 ZnO 纳米墙形貌结构及性能的影响。实验结果表明, ZnO 纳米墙呈多孔状, 具有纤锌矿晶体结构, 沿 (002) 晶面择优生长。在拉曼光谱可观察到 438 cm^{-1} 处的 $E_2(\text{high})$ 模, 光谱具有较强烈的紫外激发峰以及较弱的深能级可见光发射峰, ZnO 纳米墙对紫外光的

吸收率较高。在硝酸锌水溶液浓度、沉积时间一定的条件下, 随着沉积电压的增大, ZnO 纳米墙的密度先增大后减小; 当沉积电压过大时, 出现坍塌现象。当沉积电压为 1.6 V 时, 多孔结构的 ZnO 纳米墙的结构致密, 均匀性最好, 结晶度最高。紫外探测测试结果表明, ZnO 纳米墙对紫外光有快速响应恢复性能; 当沉积电压为 1.6 V 时, ZnO 纳米墙的光电流强度最大、灵敏度最佳, 对应的响应时间和恢复时间分别为 1.36 s 和 2.23 s; 在 5 V 偏压下, 光暗

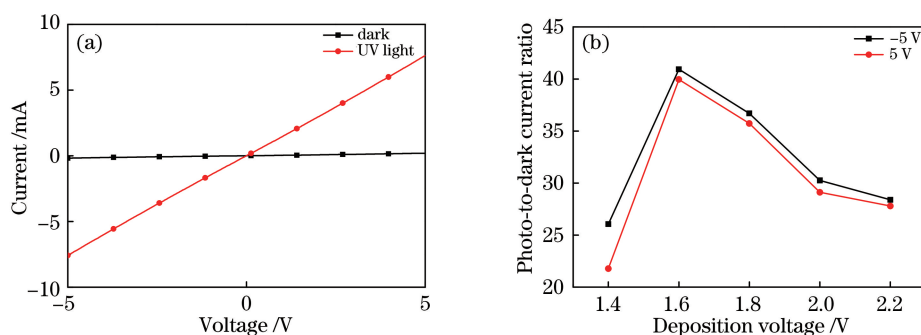


图 8 ZnO 纳米墙的 I - V 特性。(a) 沉积电压为 1.6 V 时 ZnO 纳米墙的 I - V 特性;
(b) ZnO 纳米墙的光暗电流比随沉积电压的变化

Fig. 8 I - V characteristics of ZnO nanowalls. (a) I - V characteristics of ZnO nanowalls at deposition voltage of 1.6 V; (b) photo-to-dark current ratio of ZnO nanowalls versus deposition voltage

电流比为 38.96, 光电响应度为 0.611 A/W。

参 考 文 献

- [1] Duan Y H, Cong M Y, Jiang D Y, et al. Spectral response cut off wavelength of ZnO ultraviolet photodetector modulated by bias voltage [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2004001.
段雨晗, 丛明煜, 蒋大勇, 等. 电压调制 ZnO 紫外探测器光响应截止波长的研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2004001.
- [2] Hu K Y, Chen Y C, Zhang X H, et al. Modulation growth and surface hydrogenation treatment of ZnO:W transparent conductive films [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0531001.
胡克艳, 陈义川, 张效华, 等. ZnO:W 透明导电薄膜的调制生长与表面氯化处理 [J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0531001.
- [3] Yu S G, Zhang H Y, Chen C, et al. Investigation of humidity sensor based on Au modified ZnO nanosheets via hydrothermal method and first principle [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 287: 526-534.
- [4] Harathi N, Kavitha S, Sarkar A. ZnO nanostructured 2D layered SAW based hydrogen gas sensor with enhanced sensitivity [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33(7): 2621-2625.
- [5] Yu L M, Wei J S, Luo Y Y, et al. Dependence of Al^{3+} on the growth mechanism of vertical standing ZnO nanowalls and their NO_2 gas sensing properties [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 204: 96-101.
- [6] Islavath N, Das D, Joshi S V, et al. Seed layer-assisted low temperature solution growth of 3D ZnO nanowall architecture for hybrid solar cells [J]. Materials & Design, 2017, 116: 219-226.
- [7] Li Z J, Hu Z F, Jiang L, et al. Synthesis and optical properties of three-dimensional nanowall ZnO film prepared by atmospheric pressure chemical vapor deposition [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(24): 10175-10179.
- [8] Li C, Yu L M, Yuan X, et al. Ag nanorods assembled with ZnO nanowalls for near-linear high-response UV photodetectors [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 830: 154652.
- [9] Ma S, Yu L M, Cao L, et al. Resistive-type UV-visible photodetector based on CdS NWs /ZnO nanowalls heterostructure fabricated using *in situ* synthesis method [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827: 154090.
- [10] Li C, Fan X H, Yu L M, et al. A resistive-type UV detector based on ZnO nanowalls decoated by Ag nanowires [J]. Optical Materials, 2020, 103: 109891.
- [11] Maeng J, Jo G, Choe M, et al. Structural and photoluminescence characterization of ZnO nanowalls grown by metal organic chemical vapor deposition [J]. Thin Solid Films, 2009, 518(2): 865-869.
- [12] Chen T P, Chang S P, Hung F Y, et al. Simple fabrication process for 2D ZnO nanowalls and their potential application as a methane sensor [J]. Sensors 2013, 13(3): 3941-3950.
- [13] Zhang W, He Y N, Cui W Z. Low temperature hydrothermal growth and the properties of ZnO nanowall films [J]. Chemical Industry and Engineering, 2010, 27(4): 283-287.
张雯, 贺永宁, 崔万照. ZnO 纳米墙薄膜的低温水热制备及其性能研究 [J]. 化学工业与工程, 2010, 27(4): 283-287.
- [14] Tang Y. Fast electrochemical deposition and non-radiative recombination of ZnO nanorods [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1616001.
汤洋. 快速电沉积氧化锌纳米柱及其非辐射复合 [J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1616001.

- [15] Mo G K, Liu J H, Zou Z L, et al. Preparation of low-resistivity GZO thin films using pulsed laser deposition and investigation of optoelectronic properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1003001.
莫观孔, 刘家辉, 邹卓良, 等. 脉冲激光沉积法制备低阻掺镓氧化锌薄膜及其光电性能[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1003001.
- [16] Liu Q P, Li Q, Geng L Y, et al. Effect of Co doping concentration on structure and optical properties of ZnO nanorod [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(6): 1007-1011, 1018.
刘巧平, 李琼, 耿雷英, 等. Co 掺杂浓度对 ZnO 纳米棒结构和光学性能影响研究[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(6): 1007-1011, 1018.
- [17] Wen J. Investigation of RT-Raman scattering of La-doped ZnO[J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition), 2010, 34(5): 541-543, 559.
文军. La 掺杂氧化锌纳米颗粒的室温拉曼特性[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 541-543, 559.
- [18] Silva R L D S E, Franco A, Jr . Raman spectroscopy study of structural disorder degree of ZnO ceramics [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2020, 119:105227.
- [19] Dash P, Manna A, Mishra N C, et al. Synthesis and characterization of aligned ZnO nanorods for visible light photocatalysis[J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2019, 107: 38-46.
- [20] Liu B, Wu Y S, Wu L L, et al. Preparation and characterization of single-crystal ZnO nanorods via a H₂O₂-assisted hydrothermal method [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2011, 32(5): 423-427.
刘宝, 吴佑实, 吴莉莉, 等. 单晶 ZnO 纳米棒的 H₂O₂ 辅助水热法制备与表征[J]. 发光学报, 2011, 32(5): 423-427.
- [21] Zhang R, Zhu Y B, Bi Y, et al. Fabrication and its optical properties of ordered ZnO nanoparticle arrays [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0630003.
张锐, 朱亚彬, 毕玉, 等. 有序 ZnO 纳米阵列的制备及其光学特性 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0630003.
- [22] Rajabathar J R, Munusamy M A, Al-Lohedan H A. Preparation, textural and photoluminescence characterization of green fluorescence protein-immobilised Ga-ZnO (GZO)-nanocomposites [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2016, 165:202-212.
- [23] Shi Z F, Zhang Y T, Zhuang S W, et al. Vertically aligned two-dimensional ZnO nanowall networks: controllable catalyst-free growth and optical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 620:299-307.
- [24] Yuan X. Modification and photoelectric sensing properties of ZnO nanowalls [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019: 18-28.
袁雄. ZnO 纳米墙的修饰及光电气敏特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019: 18-28.
- [25] Shen X, Xu G Y, Cheng C W, et al. Synthesis, characterization of ZnO with different morphology and its infrared emissivity investigation [J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(A10): 3988-3990.
沈轩, 徐国跃, 程传伟, 等. 不同形貌 ZnO 的制备、表征及 8~14 μm 红外发射率研究 [J]. 功能材料, 2007, 38(A10): 3988-3990.