

衬底退火温度对 ZnO 纳米结构形貌和发光特性的影响

陈速娟, 郑卫峰, 林算治, 瞿燕, 赖发春*¹

(福建师范大学 物理与能源学院, 福建 福州 350007)

摘要:利用热蒸发 Zn 粉的方法,在 Au/掺铝氧化锌(AZO)/石英衬底上生长 ZnO 纳米结构。为了研究不同温度退火后的衬底对生长的 ZnO 纳米结构的影响,Au/AZO/石英衬底在生长纳米结构前分别在 300、500 和 700 °C 真空下退火。Au/AZO/石英衬底的表面形貌用原子力显微镜(AFM)观测。ZnO 纳米结构的微结构、形貌和光学性能分别用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)和荧光光谱仪进行测量。结果表明,在未退火和 300 °C 退火衬底上生长了大量的 ZnO 纳米棒,而在 500 °C 和 700 °C 退火衬底上沉积了大量 ZnO 纳米颗粒。单晶结构的纳米棒的平均直径分别约 50 nm 和 80 nm,其生长机制为蒸气-液体-固体(VLS)生长机制。荧光光谱显示所有的样品都存在紫外发光峰和深能级发射带,随着退火温度的升高,生长的纳米结构的紫外发光峰相对强度增强,而深能级发射强度减弱。

关键词:ZnO; 纳米结构; 热蒸发; 衬底; 退火

中图分类号:O484 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2013)10-1953-07

Effect of annealing temperature of substrate on the morphologies and luminescence properties of ZnO nanostructures

CHEN Su-juan, ZHENG Wei-feng, LIN Suan-zhi, QU Yan, LAI Fa-chun*

(College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract:ZnO nanostructures were successfully grown on Au/Al-doped ZnO (AZO) film/quartz substrates by thermal evaporation of Zn powders. In order to investigate the effect of post-annealed substrate on the growth of ZnO nanostructure, Au/AZO/quartz substrates were annealed at 300 °C, 500 °C, and 700 °C in vacuum, respectively. The surface morphologies of substrates were observed by atomic force microscopy (AFM). The microstructure, morphologies, and optical properties of ZnO nanostructures were studied by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscope (TEM), and fluorescence spectrophotometer, respectively. The results show that high-density ZnO nanorods were grown on the as-deposited and annealed substrate at 300 °C, while nanoparticles were observed on the substrates annealed at 500 °C and 700 °C. The average diameters of the nanorods with single-crystalline structure are about 50 nm and 80 nm. The grown mechanism of nanorods is vapor-liquid-solid (VLS) mechanism. Room temperature photoluminescence (PL) spectra show that the PL spectra of all samples have a UV emission peak and a broad deep-level emission peak. Moreover, as the annealing temperature increases, the intensity of UV emission enhances and the intensity of deep-level emission declines.

Key words:ZnO; nanostructure; thermal evaporation; substrate; annealing

* E-mail: laifc@fjnu.edu.cn

收稿日期:2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(11074041,11374052)和福建省自然科学基金(2012J01256,2013J01174)资助项目

1 引言

ZnO 纳米结构的量子尺寸效应,使得其比体材料更容易实现室温下的紫外受激发射。因而,制备 ZnO 纳米材料是实现 ZnO 材料室温下紫外受激发射的一种有效途径,也使得 ZnO 纳米线用作紫外激光器成为可能^[1]。并且,ZnO 还具有良好的导热、导电和化学稳定性,在太阳能电池^[2]、传感器^[3]和发光二极管^[4]等领域有广泛的应用前景。

制备 ZnO 纳米结构的方法主要有水热法、脉冲激光沉积、模板法、微乳液法、热蒸发法(蒸汽相运输法)和化学气相沉积法等^[5~10]。其中,热蒸发法具有装置简单和生产效率高优点而广泛使用。在热蒸发生长 ZnO 纳米结构中,若使用金属催化剂(通常为 Au),则其生长机制为蒸汽-液体-固体(VLS)生长机制^[11];在没有使用催化剂时,纳米结构的生长机制通常是蒸汽-固体(VL)生长机制^[12]。但是,在纳米结构的生长过程中,催化剂的特性^[13]、衬底种类^[14]、表面形貌^[15]、缓冲层^[16]以及衬底退火^[17~19]等均对生长的 ZnO 纳米结构有重要影响。例如,Ho 等^[15]在宝石、玻璃和 Si 片等不同基片上热蒸发生长 ZnO 纳米线,发现利用机械抛光、化学腐蚀等方法对基片进行处理后,可以在不同的基片上成功地生长出垂直阵列的 ZnO 纳米线;Zhao 等^[18]和 Shin 等^[19]利用水热法在 ZnO/Si 衬底上生长 ZnO 纳米棒,将衬底在不同温度和不同时间条件下进行退火处理,发现退火后 ZnO 缓冲层的结晶特性和表面形貌发生明显改变。可见,衬底的退火处理对 ZnO 纳米结构的生长有显著影响。

本文用热蒸发法在制备态和退火后的 Au/掺铝氧化锌(AZO)/石英衬底上生长 ZnO 纳米结构,分析生成物的结构、形貌和发光特性,研究衬底退火对 ZnO 纳米结构的影响。

2 实验

2.1 AZO 膜的制备

在石英基片上射频磁控溅射沉积 AZO 薄膜^[20]。石英基片厚为 1.0 mm,长宽为 2.5 cm × 2.5 cm。溅射靶材为商业生产的 ZnO 与 Al₂O₃ 混合陶瓷靶,其中 Al₂O₃ 的重量比为 3%。镀膜前,分别用丙酮和酒精超声清洗基片;靶材与基片之间的距离为 6 cm;本底真空度为 4.0 × 10⁻⁴ Pa,基片温度为 250 °C,质量流量计控制 Ar 气(99.9%)的流量为 50 sccm。沉积时的工作气压和溅射功率分别为 0.5 Pa 和 300 W,沉积时间为 7 min,

AZO 薄膜的厚约 500 nm。

2.2 沉积 Au 膜

采用 DM-450A 型镀膜机在 AZO 薄膜热蒸发沉积厚约 5 nm 的 Au 膜。沉积前真空腔的气压为 3.6 × 10⁻³ Pa,蒸发时的真空度为 5.0 × 10⁻³ Pa,蒸发电流约为 120 A,基片与蒸发源距离大致为 28 cm,厚度由石英晶振监控仪监控。

2.3 衬底退火及 ZnO 纳米结构的生长

衬底的退火和 ZnO 纳米结构的生长是在如图 1 所示的水平管式炉中进行的^[21]。衬底退火是将 Au/AZO 衬底放置在炉子的加热中心,刚玉管内真空度为 11 Pa,退火温度分别为 300、500 和 700 °C,当炉子加热中心温度达到所需的温度时,立即停止加热,使衬底自然冷却。

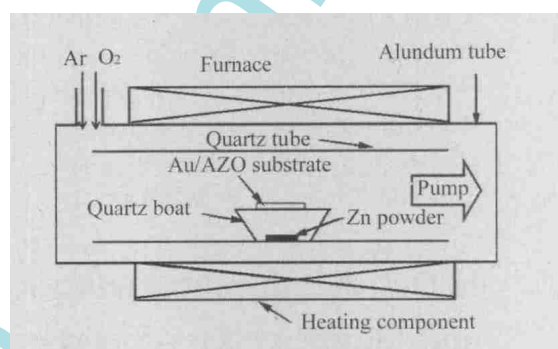


图 1 热蒸发法制备 ZnO 纳米结构的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for growing ZnO nanostructures by thermal evaporation

以 Zn 粉作为原料,高纯 Ar 气作为载流气体。先将 Zn 粉放入石英舟中,衬底背向 Zn 源并位于 Zn 源上方,然后把石英舟置于石英管内,再将石英管放置于水平管式炉中,使 Zn 粉处于刚玉管的加热中心。

用机械泵对刚玉管抽真空,当刚玉管内真空度达到 11 Pa 时,以 20 °C/min 的升温速率对刚玉管进行加热;当 Zn 蒸发源温度达到 600 °C 时,由质量流量计控制向刚玉管内引入 100 sccm 的高纯 Ar 气(99.9%)和 10 sccm 的高纯 O₂(99.9%),此时系统气压为 120 Pa,沉积 8 min 后,关闭气路和加热系统。纳米结构生长过程中,系统温度保持 600 °C,真空泵处于开启状态。待系统自然冷却至室温时,取出样品。

衬底的表面形貌用型号为 CSPM400 的原子力显微镜(AFM)在大气下测量,分辨率为 512 pixels ×

512 pixels,扫描面积为 $3\ \mu\text{m}\times 3\ \mu\text{m}$ 。制备样品的微结构用 Y-2000 型 X 射线衍射(XRD)仪测量,所用的波长为 Cu 靶 K_{α} 线($\lambda=0.1542\ \text{nm}$),扫描范围为 $20\sim 80^{\circ}$,扫描速度为 $8^{\circ}/\text{min}$;样品的形貌和内部结构用 JSM-7500L 型扫描电子显微镜(SEM)和 JEM-

2010 型透射电子显微镜(TEM)进行观测。成分特性用 TEM 中的能量色散谱(EDS)进行测量。样品的光致发光(PL)特性是在室温下用 Fluorolog 3-22 型荧光光谱仪测量,激发光源为氙灯,波长为 $325\ \text{nm}$ 。

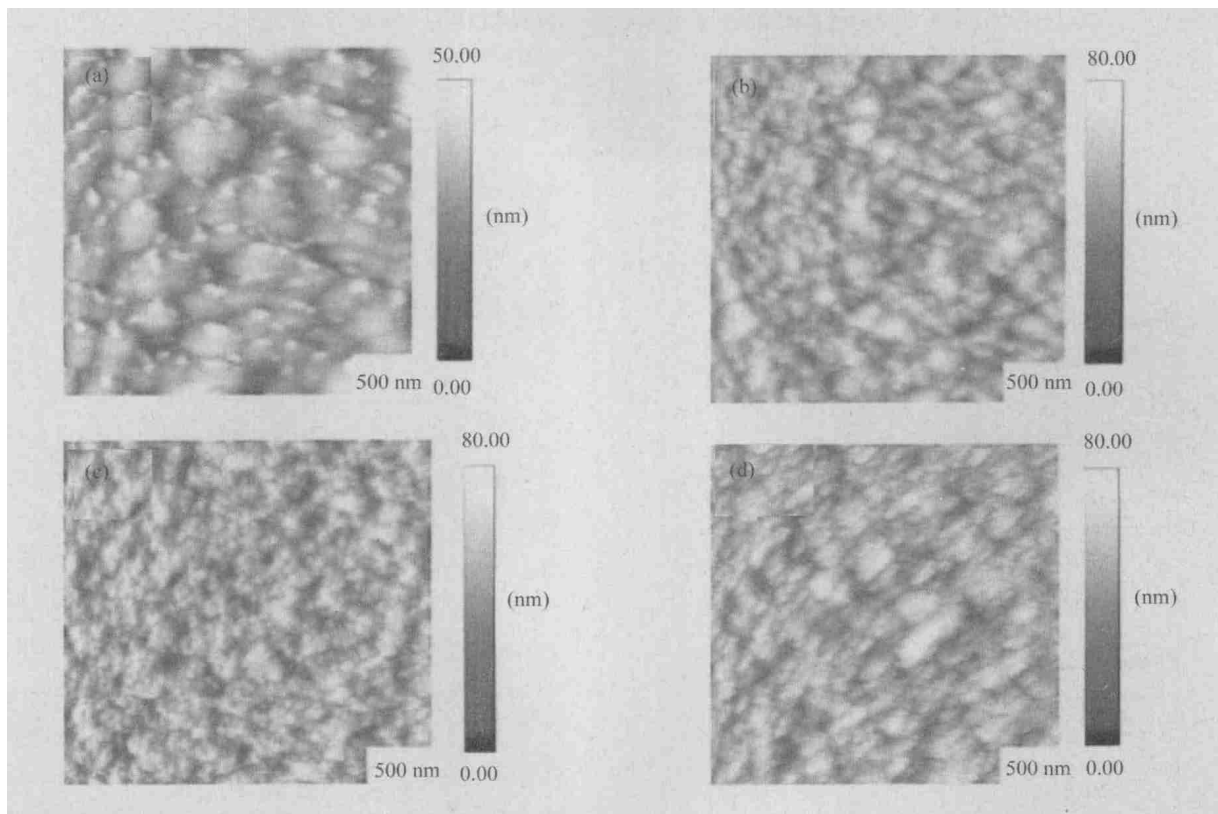


图 2 制备态和不同温度退火后 Au/AZO 薄膜表面的 AFM 形貌图像:(a) 制备态;(b) $300\ ^{\circ}\text{C}$;(c) $500\ ^{\circ}\text{C}$;(d) $700\ ^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 AFM surface morphologies of the as-deposited Au/AZO films and those annealed at different temperatures: (a) As-deposited; (b) $300\ ^{\circ}\text{C}$; (c) $500\ ^{\circ}\text{C}$; (d) $700\ ^{\circ}\text{C}$

3 结果与讨论

3.1 衬底的表面形貌

由图 2 可见,经过退火后薄膜的表面发生较大的改变,退火前表面的最高处和最低处高度相差约为 $50\ \text{nm}$,而经退火后高度相差可达 $80\ \text{nm}$ 。利用 AFM 数据分析软件计算样品的均方根(RMS)表面粗糙度和表面颗粒平均直径(GS),结果见表 1。

表 1 薄膜表面的 RMS 和 GS

Tab. 1 RMS and GS of surface particles of the Au/AZO films

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	As-deposited	300	500	700
GS	73.3	55.0	51.2	48.9
RMS	9.05	11.9	13.8	12.4

由表 1 可知,随着退火温度的升高,薄膜表面的 GS 单调递减,退火温度增加到 $700\ ^{\circ}\text{C}$ 时,GS 为 $48.9\ \text{nm}$;相应地,薄膜的 RMS 先增大后减小。薄膜表面颗粒尺寸和表面粗糙度的变化与 AZO 薄膜在真空中退火后结晶性能的改变^[22],以及 Au 膜在退火过程中的凝聚特性相关。当退火温度为 $300\ ^{\circ}\text{C}$ 时,表面粗糙度增大,这是由于 Au 原子凝聚成为团簇,从而使表面粗糙度增大;当退火温度升高到 $700\ ^{\circ}\text{C}$ 时,表面粗糙度反而降低了,这可能是由于部分的 Au 原子团簇从自由能高的地方运动到自由能较低的“低洼”处^[23],从而降低了薄膜的表面粗糙度。这些结果说明,退火温度对 Au/AZO 薄膜的表面形貌有着重要的影响。

3.2 生成物的微结构

在制备态和不同温度退火的衬底上生长样品的 XRD 谱如图 3 所示。4 个样品均无金属 Zn 的衍射

峰,只有 ZnO 的衍射峰。对照 ZnO 的标准图谱发现,所有的衍射峰均对应于六角纤锌矿结构,表明 ZnO 六角晶体是唯一的生成物。图中,(002)衍射峰强度最强,其余峰的强度相对弱,说明 ZnO 纳米结构沿 *c* 轴择优生长,即与衬底垂直方向生长,形成垂直于衬底的 ZnO 纳米结构;在 300 °C 退火衬底上生长样品的(002)峰最为尖锐,说明该样品的结晶性能最好。

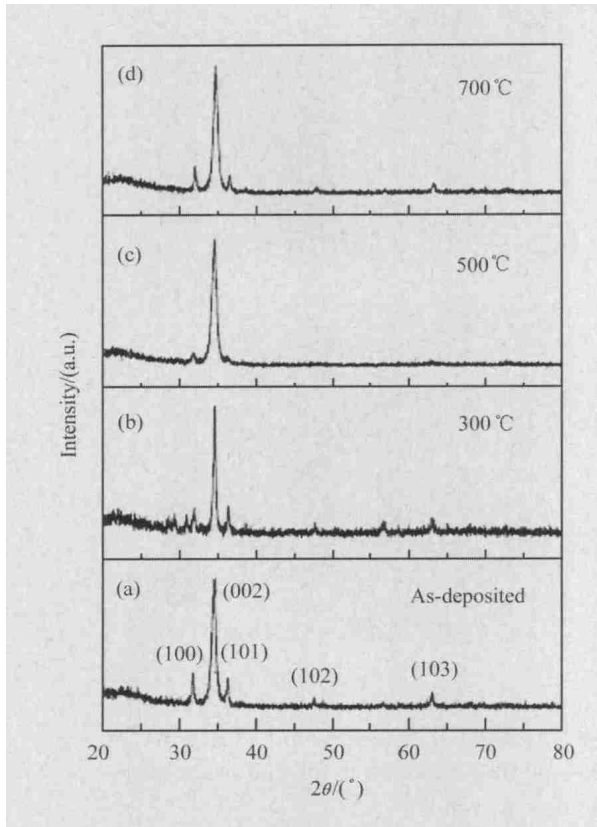


图3 制备态和不同温度退火的衬底上生长样品的 XRD 谱:(a) 制备态;(b)300 °C ; (c) 500 °C ;(d) 700 °C

Fig. 3 XRD patterns of samples grown on substrates with different annealing temperatures: (a) As-deposited; (b) 300 °C ; (c) 500 °C ;(d) 700 °C

3.3 ZnO 纳米结构的形貌和内部结构

3.3.1 SEM 表征

由图 4 可见,在制备态的 Au/AZO 薄膜衬底上生长了大量的 ZnO 纳米棒,纳米棒的平均直径大致为 50 nm,长度在 300~400 nm 之间;在 300 °C 退火的衬底上也生长了大量的纳米棒,其平均直径大致为 80 nm,长度在 500 nm 以内;然而,在 500 °C 和 700 °C 退火的衬底上生长的都是 ZnO 纳米颗粒,颗

粒的平均直径分别是 90 nm 和 80 nm 左右。从衬底表面的 AFM 测量结果(图 2 及表 1)可知,衬底经真空退火后,其表面粗糙度和表面颗粒尺寸均发生变化,衬底性质的这些变化导致了生长的纳米结构的变化。从先前的研究结果可知,在 Au 催化生长 ZnO 纳米结构时,催化剂颗粒的大小对生长的 ZnO 纳米结构的直径有重要影响,且满足^[24]

$$d = 2\left(\frac{3V}{\pi}\right)^{1/3} \frac{(1 + \cos\beta)^{1/2}}{(1 - \cos\beta)^{1/6} (2 + \cos\beta)^{1/3}} \quad (1)$$

其中:*d* 为纳米结构的直径;*V* 为 Au 催化剂颗粒体积; β 为 Au 催化剂的浸润角。因此,经不同温度退火后衬底上生长不同形貌的 ZnO 纳米结构是由于 Au 催化颗粒大小以及衬底不同表面形貌等特性的结果。

3.3.2 TEM 及 EDS 表征

从图 5 中可看出,纳米棒顶端有一直径约 2 nm 的颗粒(图中圆圈内)。图 6 的 EDS 能谱表明,该纳米棒的顶端含有元素 Au、Zn 和 O(图中的元素 Cu 来自 TEM 的铜网),说明该颗粒为 Au 催化剂颗粒,因而纳米棒的生长机制可以归结为 VLS 机制^[11]。

图 7(a)是 300 °C 退火的衬底上生长的单根 ZnO 纳米棒的 TEM 照片,纳米棒的直径约为 20 nm;图 7 (b)给出了此纳米棒的高分辨率 TEM 图像,其中的插图为选区电子衍射图。

图 7(b)的连续晶格条纹表明了纳米棒是单晶结构,且结构完整,没有堆垛层错、位错等结构缺陷,样品沿着(001)方向定向生长。选区电子衍射图中出现了清晰的衍射斑点,同样表明所得的纳米棒为单晶且沿[001]方向生长。

3.4 ZnO 纳米结构的光学性质

图 8 给出了不同衬底上生长的纳米结构的室温 PL 谱。4 个样品的发光谱均包含两个发光峰,分别位于 375 nm 附近的紫外发光峰和 480~600 nm 的深能级发射带。其中,紫外发光峰是 ZnO 的禁带边辐射,而深能级发射峰与 ZnO 的缺陷和杂质相关。ZnO 的发光特性可用紫外发射峰与深能级发射峰强度的比值 *R* 表示^[25]。制备态、300、500 和 700 °C 退火衬底上生长样品的 *R* 分别为 1.09、1.90、2.01 和 3.07。可见,*R* 随退火温度的升高而增大,这可能是由于 Au 催化剂对生长 ZnO 纳米结构产生影响的结果^[26]。此外,由图 4 可知,在制备态衬底上生长的纳米棒的直径最小,其表面的缺陷态最多,导致其深能级发射最强,这是由于深能级发射峰强度与纳米棒的直径成反比^[27]。

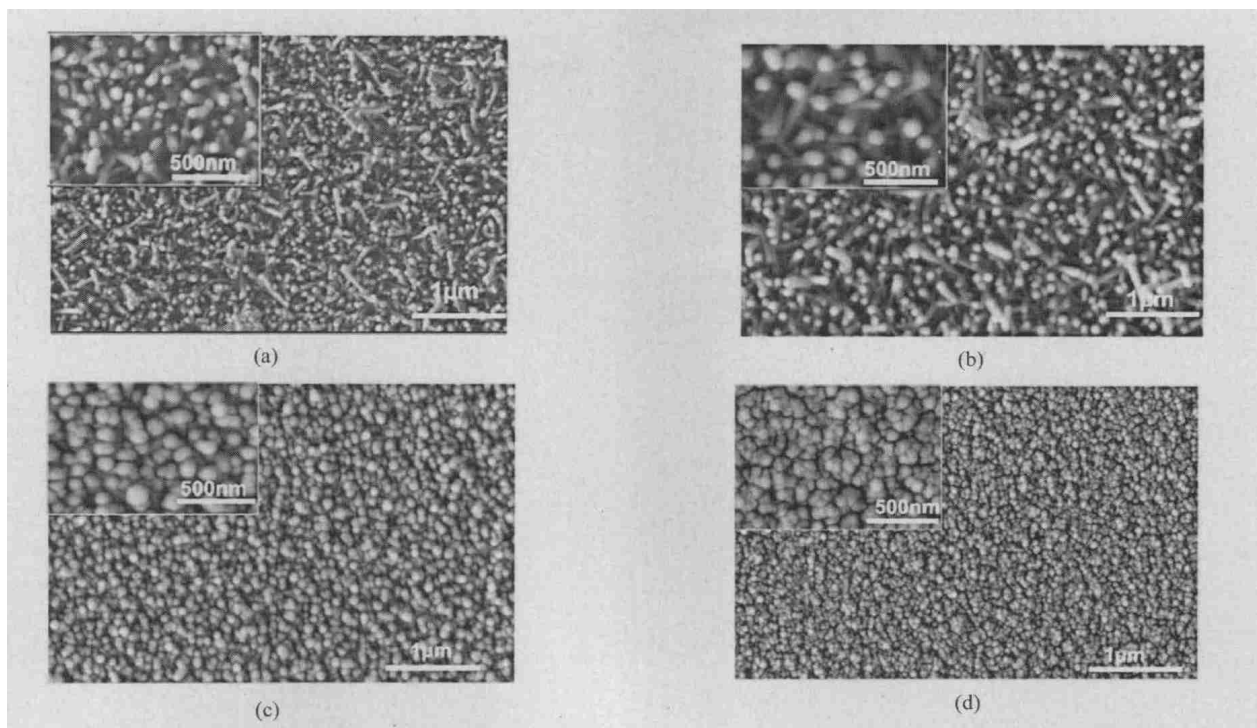


图 4 制备态和不同温度退火的衬底上生长 ZnO 纳米结构的 SEM 表面形貌图:
(a) 制备态;(b) 300 °C;(c) 500 °C;(d) 700 °C

Fig. 4 SEM images of ZnO nanostructures grown on substrates with different annealing temperatures:
(a) As-deposited;(b) 300 °C;(c) 500 °C;(d) 700 °C

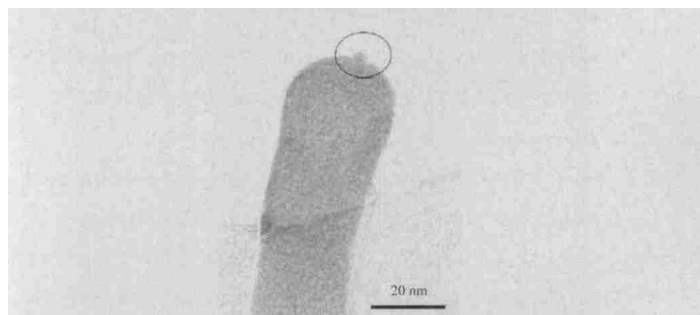


图 5 在 300 °C 退火的衬底上生长的 ZnO 纳米棒的 TEM 图
Fig. 5 TEM image of the ZnO nanorod grown on the substrate annealed at 300 °C

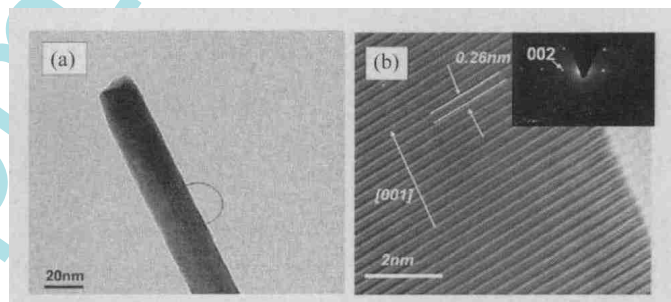


图 7 在 300 °C 退火的衬底上生长 ZnO 纳米棒的 TEM 图像:(a)和(b)分别代表低倍和高倍图;
(b)中的插图为选区的电子衍射图

Fig. 7 TEM images of a nanorod grown on the substrate annealed at 300 °C:(a) and (b) Low and high magnification images (Inset is the corresponding selected area electron diffraction pattern.)

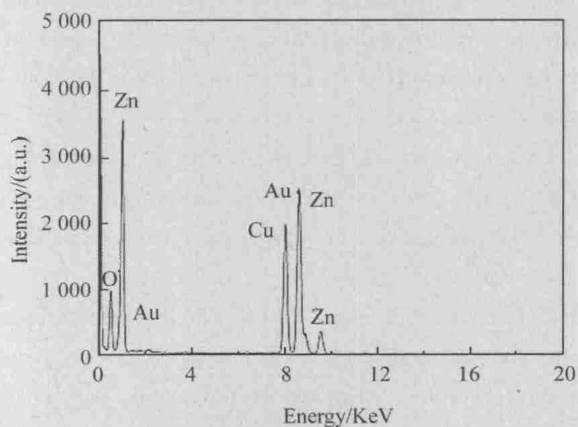


图 6 纳米棒顶端颗粒的 EDS 谱

Fig. 6 EDS spectrum of the particle at the end of the nanorod

4 结 论

用磁控溅射方法在石英基片上沉积 AZO 薄膜,然后在 AZO 薄膜热蒸发沉积 5 nm 厚的 Au 膜,以此为衬底,采用热蒸发的方法生长 ZnO 纳米结构。将 Au/AZO 衬底在真空条件下不同温度进行退火处理,研究衬底退火对生长的 ZnO 纳米结构的形貌和光学性质的影响。在制备态和 300 °C 退火衬底上生

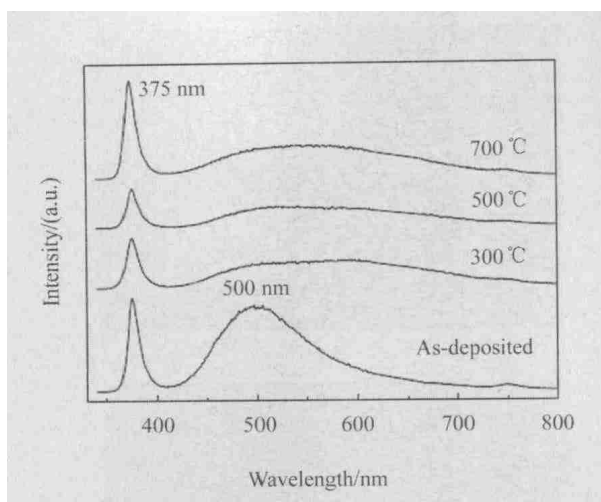


图8 不同衬底上生长 ZnO 纳米结构的室温 PL 谱

Fig. 8 Room-temperature PL spectra of ZnO nanostructures on substrates with different annealing temperatures

长了大量的单晶结构的 ZnO 纳米棒, 纳米棒的平均直径分别约为 50 nm 和 80 nm, 长度在 500 nm 以内, 其生长机制为 VLS 机制。而在 500°C 和 700°C 退火衬底上生长的是纳米颗粒。PL 谱说明, 所有样品都存在紫外发光峰和深能级发射带, 且随着衬底退火温度的升高, 样品的深能级发射相对强度减弱, 紫外发光强度增强。

参考文献:

- [1] Huang M H, Mao S, Yang P D, et al. Room temperature ultraviolet nanowire nanolasers [J]. *Science*, 2001, **292** (5523): 1897.
- [2] Wang L D, Zhao D X, Su Z S, et al. Hybrid polymer/ZnO solar cells sensitized by PbS quantum dots [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2012, **7**: 106.
- [3] LIU Hong, WANG Wei-sheng. Synthesis and optical properties of two novel ZnO flowerlike and spindlelike nanostructures [J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, **7** (2): 81-84.
- [4] CAI Jing-wei, XU Jian-ping, ZHANG Xiao-song, et al. Defect-related visible luminescence of ZnO nanorods annealed in oxygen ambient [J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, **8** (1): 4-8.
- [5] Zhang J, Que W X, Jia Q Y, et al. Controllable hydrothermal synthesis of ZnO nanowires arrays on Al-doped ZnO seed layer and patterning of ZnO nanowires arrays via surface modification of substrate [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257** (23): 10134-10140.
- [6] Kumarakuru H, Cherns D, Fuge G M. The growth of Al-doped ZnO nanorods on c-axis sapphire by pulsed laser deposition [J]. *Surf. Coat. Tech.*, 2011, **205** (21-22): 5083-5087.
- [7] Mo G C M, Zhang L D, et al. Photoluminescence of ZnO nanoparticles in alumina membrane with ordered pore arrays [J]. *Solid State Commun.*, 2000, **115** (5): 253-256.
- [8] Guo L, Ji Y L, Xu H B, et al. Regularly shaped single crystalline ZnO nanorod with wurtzite structure [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, **124** (50): 14864-14865.
- [9] Tang H P, Ye Z Z, Zhu L P, et al. Synthesis of radial ZnO nanostructures by a simple thermal evaporation method [J]. *Physica E*, 2008, **40** (3): 507-511.
- [10] Terasako T, Yagi M, Ishizaki M, et al. Growth of zinc oxide films and nanowires by atmospheric-pressure chemical vapor deposition using zinc powder and water as source materials [J]. *Surf. Coat. Tech.*, 2007, **201** (22-23): 8924-8930.
- [11] Wu Y Y, Yang P D. Direct observation of vapor-liquid-solid nanowire growth [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2001, **123** (13): 3165-3166.
- [12] Conradt J, Sartor J, Thiele C, et al. Catalyst-free growth of zinc oxide nanorod arrays on sputtered aluminum-doped zinc oxide for photovoltaic application [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2011, **115** (9): 3539-3543.
- [13] Zhang Z, Wang S J, Yu T, et al. Controlling the growth mechanism of ZnO nanowires by selecting catalysts [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2007, **111** (47): 17500-17505.
- [14] Nayak J, Sahu S N, Kasuya J, et al. Effect of substrate on the structure and optical properties of ZnO nanorods [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41** (11): 115303.
- [15] Ho S T, Chen K C, Chen H A, et al. Catalyst-free surface-roughness-assisted growth of large-scale vertically aligned zinc oxide nanowires by thermal evaporation [J]. *Chem. Mater.*, 2007, **19** (16): 4083-4086.
- [16] Mohanta S K, Kim D C, Cho H K, et al. Influence of buffer layer on structural and optical properties of ZnO nanorods on glass substrates [J]. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2008, **11** (6): 143-146.
- [17] Kim A R, Lee J Y, Jang B R, et al. Effect of post annealing of ZnO buffer layer on the properties of hydrothermally grown ZnO nanorods [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, **49** (6): 06GH10.
- [18] Zhao X Q, Kim C R, Lee J Y, et al. Effects of buffer layer annealing temperature on the structural and optical properties of hydrothermal grown ZnO [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255** (8): 4461-4465.
- [19] Shin C M, Lee J Y, Heo J H, et al. Effects of the annealing duration of the ZnO buffer layer on structural and optical

- properties of ZnO rods grown by a hydrothermal process [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(20):8501-8505.
- [20] FAN Li-qin, PEI Yu, LIN Li-mei, et al. Influence of sputtering power on the optical and electrical properties of ZnO:Al films [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2008, **24**(5):44-48.
范丽琴,裴瑜,林丽梅等,溅射功率对掺铝氧化锌薄膜光电学性质的影响[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2008, **24**(5):44-48.
- [21] LIN Suan-zhi, LI Mei, LIN Jian-ping, et al. Effect of the direction of AZO seed layer on morphologies and luminescence properties of ZnO nanorods [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(6):1103-110.
林算治,林丽梅,林建平,等. AZO 种子层朝向对 ZnO 纳米棒形貌和发光特性的影响[J]. *光电子 • 激光*, 2012, **23**(6):1103-1108.
- [22] Minami T, Hirano T, Miyata T, et al. Influence of rapid thermal annealing on surface texture-etched Al-doped ZnO films prepared by various magnetron sputtering methods [J]. *Thin Solid Films*, 2012, **520**(10):3803-380.
- [23] Roozbehi M, Sangpourb P, Khademi A, et al. The effect of substrate surface roughness on ZnO nanostructures growth [J]. *App. Surf. Sci.*, 2011, **257**(8):5861-5865.
- [24] Crawford S, Lim S K, Gradecak S, et al. Fundamental insights into nanowire diameter modulation and the liquid/solid interface [J]. *Nano Lett.*, 2013, **13**(1):226-232.
- [25] Kashiwaba Y, Haga K, Watanabe H, et al. Structures and photoluminescence properties of ZnO films epitaxially grown by atmospheric pressure MOCVD [J]. *Phys. Stat. Sol. B*, 2002, **229**(2):921-924.
- [26] Zhao Q X, Klason P, Willander M. Growth of ZnO nanostructures by vapor-liquid-solid method [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **88**(1):27-30.
- [27] Ng H T, Chen B, Li J, et al. Optical properties of single-crystalline ZnO nanowires on m-sapphire [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(13):2023-2025.

作者简介:

赖发春 (1965—),男,福建上杭人,理学博士,教授,主要从事光电子材料的研究。

www.spm.com.cn