

等离子体增强热氧化法制备氧化锌纳米棒及其反应机制

郭 斌^{1,2}, 傅骏驰^{1,2}, 渠亚洲¹, 程其进^{1,2*}

(1. 厦门大学能源学院, 福建 厦门 361102; 2. 厦门大学深圳研究院, 广东 深圳 518000)

摘要: 提出一种等离子体热氧化法, 即通过自制的等离子体增强水平管式炉沉积系统, 将金属锌箔在氧气与氩气混合气体中放电生成氧化锌纳米棒, 并考察了反应温度、氩气与氧气的流量比以及放电电流对生成的氧化锌的形貌和微观结构的影响. 结果发现: 在反应温度为 500 °C、氩气与氧气流量比(体积比)为 9:1 时, 有比较均匀、稳定的氧化锌纳米棒的生成; 并且随着电流值不断增大, 氧化锌纳米棒变长. 此外, 还提出了在等离子体条件下合成氧化锌纳米棒的生长机制: 金属锌在适当的温度条件下加热, 形成锌蒸汽并在锌箔表面凝结成金属颗粒; 然后在 O₂-Ar 气氛中, 在等离子体放电过程中 O₂ 能有效地电离为 O⁺、O₂⁺ 离子, 并在氩气辅助下进一步被等离子体转化为活化的氧原子并与锌反应形成氧化锌核, 再向富氧的区域延伸, 形成氧化锌纳米棒.

关键词: 氧化锌; 等离子体; 纳米棒; 生长机制; 热氧化

中图分类号: O 047

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2019)02-0254-06

一维纳米材料包括纳米线、纳米棒、纳米带、纳米片、纳米环等, 因具有独特的化学和物理性质而引起人们的关注. 金属氧化物纳米材料因其表面效应、量子限域效应所表现出来的光、电、磁和生物化学等特性, 以及在实际应用中不易被氧化、功耗小、反应灵敏等特点, 在纳米电子器件应用中显示出强大的生命力^[1-9].

氧化锌是一种宽禁带的直接带隙半导体, 禁带宽度为 3.37 eV, 它在光、电、磁、机械性能方面具有独特性质, 开发研究的器件主要有紫外激光器、探测器、光波导、激光二极管、声表面波器件、透明电极涂层、声光器件、薄膜晶体管、压电传感器和太阳能电池等^[10-19]. 目前氧化锌纳米材料的合成方法主要有模板法、水热法、激光烧蚀法和热氧化法^[20-23]. 其中, 模板法可以很好地控制纳米材料的形貌, 但是成本较高; 水热法制备纳米材料虽然成本较低, 但是纳米材料的形貌不可控; 激光烧蚀法能够制备可控且高质量的纳米材料, 但是设备昂贵, 不适合批量生产; 热氧化法可以很好地控制纳米材料的形貌, 但是制备工艺的稳定性不足.

因此, 本文中提出了一种基于等离子体增强水平管式炉沉积系统的制备方法, 即等离子体增强热氧化法, 采用该方法制备了氧化锌纳米棒, 考察了反应温度、氩气与氧气的流量比和放电电流对制备的样品组成和形貌的影响, 并提出了在等离子体条件下氧化锌纳米棒的生长机制.

1 实验部分

1.1 样品制备

本实验采用的自制等离子体增强水平管式炉沉积系统是在管式炉(型号 60250-12-8, 南京大学仪器厂)基础上, 两端增加一对长为 30 cm 左右的金属钼电极棒来实现等离子体放电. 该系统的反应装置如图 1 所示, 包括水平管式炉、真空泵、加热装置、进气装置等. 同时, 该系统外接一个触屏控制面板, 用以控制反应系统的真空度、气体流量和放电功率.

收稿日期: 2018-03-08 录用日期: 2018-05-17

基金项目: 深圳市基础研究项目(JCYJ20170306141238532)

*通信作者: qijin.cheng@xmu.edu.cn

引文格式: 郭斌, 傅骏驰, 渠亚洲, 等. 等离子体增强热氧化法制备氧化锌纳米棒及其反应机制[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(2): 254-259.

Citation: GUO B, FU J C, QU Y Z, et al. Synthesis and reaction mechanism of zinc oxide nanorods produced by plasma-enhanced thermal oxidation[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2019, 58(2): 254-259. (in Chinese)



<http://jxmu.xmu.edu.cn>

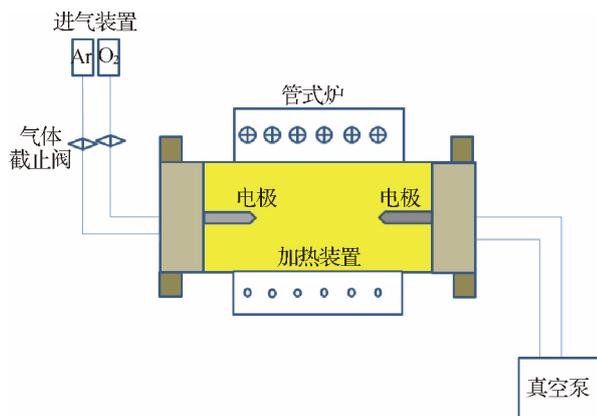


图 1 自制的等离子体增强水平管式炉沉积系统的装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of a custom-made plasma-enhanced horizontal tube furnace deposition system

样品的制备:采用尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$ 的金属锌箔作衬底,分别用去离子水、丙酮和无水乙醇超声清洗 20 min 后将其放入反应装置;抽真空至 10 Pa 以下,加热 20 min 至一定温度(分别为 $300, 350, 400, 450$ 和 $500\text{ }^\circ\text{C}$),通入氩气和氧气(流量比,即体积比分别为 $1:3, 1:1, 3:1$ 和 $9:1$),并开启等离子电源,通过调节功率来改变电流,并在恒定电流(分别为 $0.3, 1.3$ 和 2.3 A)下持续放电 20 min ;放电结束后,关闭等离子电源并切断气体通入,冷却至室温。

1.2 材料表征

通过 X 射线衍射(XRD)的方法,以 $\text{Cu K}\alpha$ 为射线源,在电压 40 kV 和电流 15 mA 的条件下检测样品结构;所测谱图经过 Jade 5.0 和 Origin 软件处理。通过 SUPRA 55 扫描电镜(SEM)和 JEM 2100 透射电镜(TEM)来表征样品的微观形貌,SEM 和 TEM 的工作电压分别为 5 和 200 kV 。采用配有 638 nm 半导体激光发射器的 Xplora 拉曼(Raman)光谱仪测定样品的 Raman 光谱,测量前先用单晶硅校准,测定功率为

1 mW ,积分时间为 30 s 。采用能谱(EDS)仪测定样品的化学成分,工作电压为 20 kV 。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

当电流为 0.3 A ,氩气和氧气流量比为 $9:1$ 时,在不同反应温度下制备的样品的 XRD 谱图如图 2(a)所示:在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 下制备的样品谱图中,只有金属锌晶面 $(002), (100), (101), (102), (103)$ 和 (110) 的衍射峰;随着反应温度的升高,样品中金属锌的衍射峰强度逐渐减弱,而氧化锌的衍射峰强度逐渐增强;在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 下制备的样品中可以清楚地看到氧化锌晶面 $(100), (002), (101), (102), (110), (103), (112)$ 和 (004) 8 个衍射峰,其中 $(100), (002)$ 和 (101) 这 3 个衍射峰强度比较强,与标准的氧化锌纳米晶体相吻合。

根据 XRD 谱图用布拉格公式计算样品的晶格常数和晶粒尺寸等,计算得到沿着晶面 (002) 方向的晶面间距 $d_{hkl} = 0.26\text{ nm}$,晶格常数 $a = 0.3245\text{ nm}, c = 0.5198\text{ nm}$,这与标准的氧化锌六方晶系晶格常数 $a = 0.3249\text{ nm}, c = 0.5027\text{ nm}$ 基本一致。说明在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 下制备的氧化锌纳米材料属于六方纤锌矿晶体结构。

当反应温度为 $450\text{ }^\circ\text{C}$,电流为 0.3 A 时,在不同的氩气与氧气流量比条件下制备的样品的 XRD 谱图如图 2(b)所示:当氩气与氧气的流量比为 $1:3$ 或 $1:1$ 时,谱图中只有锌的衍射峰,其中流量比为 $1:1$ 时晶面 $(102), (103)$ 和 (110) 衍射峰的强度较大;当氩气与氧气的流量比为 $3:1$ 时,谱图中绝大部分为氧化锌的衍射峰;当氩气与氧气的流量比为 $9:1$ 时,可以看到氧化锌的衍射峰强度随之增强。可见,在用等离子体增强热氧化法制备氧化锌纳米材料的过程中,氩气

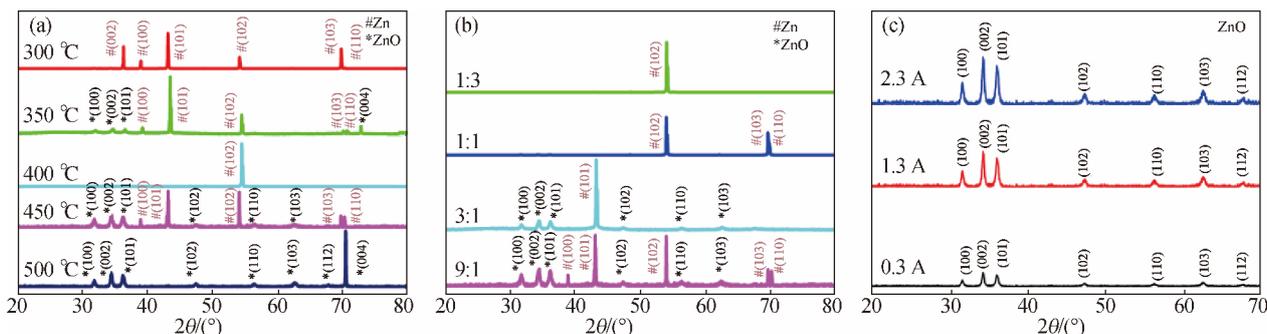


图 2 在不同反应温度(a)、氩气与氧气流量比(b)和电流(c)下制备的样品的 XRD 谱图

Fig. 2 XRD patterns of samples prepared at different reaction temperatures (a), argon and oxygen flow ratios (b), and currents (c)

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

在反应过程中起到重要作用;当氩气分压较小时不会产生氧化锌纳米晶体,随着氩气分压的增大,氧化锌的衍射峰出现并增强.

当反应温度为 500 °C,氩气与氧气流量比为 9 : 1 时,在不同电流下制备的样品的 XRD 谱图如图 2(c) 所示:3 种电流条件下都能生成氧化锌纳米晶体,所有衍射峰的位置都保持不变,且随着电流的增加,氧化锌的衍射峰强度呈上升趋势. 这表明随着电流的增加,等离子体为氧化锌的生长提供了更多的能量.

图 3 为在反应温度为 450 °C,氩气与氧气的流量比为 9 : 1,电流为 0.3 A 条件下反应生成的氧化锌纳米棒的 EDS 谱图. 图中除了氧和锌相应的峰之外,没有其他杂质峰;氧和锌的原子分数分别为 47.91% 和 52.09%,原子比接近 1 : 1. 这说明制备的氧化物为氧化锌纳米棒,但里面夹杂着未反应的锌,并含有少量的氧空位.

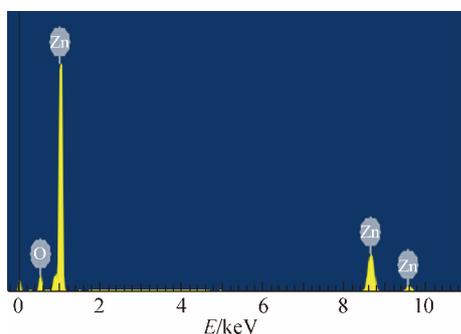
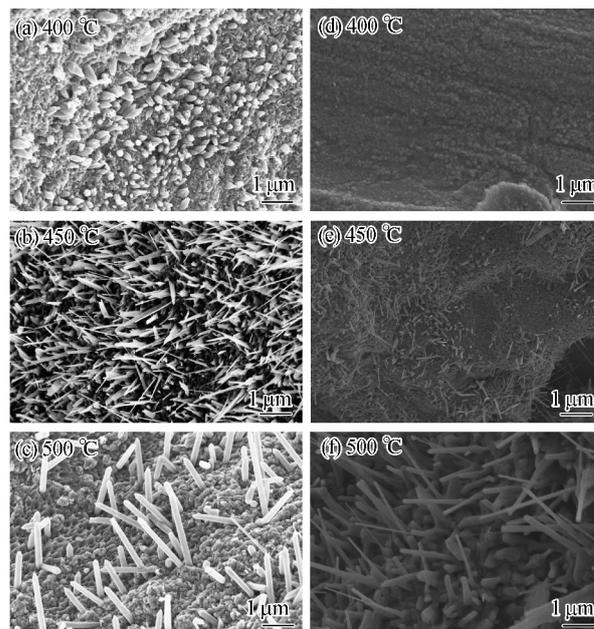


图 3 氧化锌纳米棒的 EDS 谱图
Fig. 3 EDS spectrum of ZnO nanorods

2.2 形貌分析

图 4 为分别采用等离子体增强热氧化法和热氧化法^[13]在不同反应温度下制备的样品的 SEM 图. 采用等离子体增强热氧化法制备时,在 400 °C 下铝箔上生成的氧化锌纳米棒底部粗壮而顶部锋利,在 400, 450 和 500 °C 下生成的氧化锌纳米棒的平均直径分别为 396,110 和 130 nm,平均长度分别为 0.4,1.4 和 1.8 μm. 而采用热氧化法制备时,在 400 °C 下铝箔上生成的氧化锌呈微小凸起,在 450 和 500 °C 下则生成氧化锌纳米棒,平均直径分别为 132 和 147 nm,平均长度分别为 0.9 和 1.3 μm. 可见同一温度下,通过等离子体增强热氧化法制备的氧化锌纳米棒均比热氧化法制备的长,证明等离子体在反应过程中可以提供额外的能量加快反应进程.

当反应温度为 450 °C,电流为 0.3 A 时,在不同的氩气与氧气流量比条件下制备的样品的 SEM 图如



反应条件:电流为 0.3 A,氩气和氧气流量比为 9 : 1.

图 4 采用等离子体增强热氧化法(a~c)和热氧化法(d~f)在不同反应温度下制备的样品的 SEM 图
Fig. 4 SEM images of samples prepared at different reaction temperatures using plasma enhanced thermal oxidation method (a-c) and thermal oxidation method (d-f)

图 5 所示:当氩气与氧气的流量比为 1 : 3 或 1 : 1 时,可以看到表面平坦,没有氧化锌纳米棒生成;在氩气与氧气流量比为 3 : 1 时,可以看到少量的氧化锌纳米棒生成;在氩气与氧气流量比为 9 : 1 时,有大量的氧化锌纳米棒生成. 可见,随着氩气与氧气流量比的逐渐增大,制备的样品中氧化锌纳米棒从无到有且分布越来越密集,说明通过等离子体增强热氧化法制备氧化锌纳米棒与氩气的分压有关.

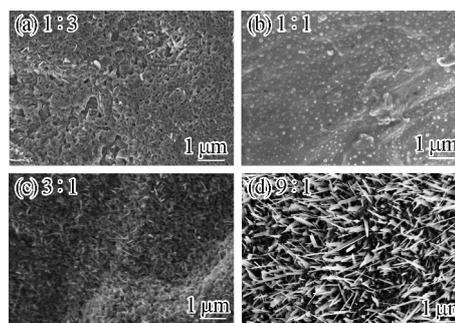


图 5 不同氩气与氧气流量比下制备的样品的 SEM 图
Fig. 5 SEM images of samples prepared under different argon and oxygen flow ratios

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

当反应温度为 500 °C, 氩气与氧气流量比为 9 : 1 时, 在不同电流下制备的样品的 SEM 图如图 6 所示: 随着电流的增大, 生成的氧化锌纳米棒的直径和长度随之增大, 在 0.3, 1.3 和 2.3 A 下, 其平均直径分别为 130, 180 和 230 nm, 平均长度分别为 1.8, 2.4 和 3.0 μm. 这是由于在相同的温度下, 增大电流能够提供更多的能量, 使气体发生电离, 氧化锌纳米棒的生长速度更快, 所以相同时间内生长得更粗更长, 这也和 XRD 谱图得出的结论一致.

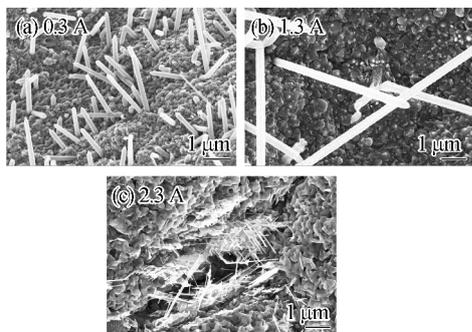


图 6 不同电流下制备的样品的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of samples prepared under different currents

图 7 为在反应温度为 450 °C, 氩气与氧气流量比为 9 : 1, 电流为 0.3 A 条件下制备的单根氧化锌纳米棒的 TEM 图. 图 7(a) 为样品制备和清洗的过程中发生断裂的单根纳米棒的一部分, 可以看出氧化锌纳米棒直径均匀, 其顶部为圆锥形的尖端, 说明它是沿着轴向均匀生长的. 从图 7(b) 氧化锌纳米棒高分辨 TEM 图可以得到沿着 [002] 方向的晶面间距为 0.26 nm. 这与通过 XRD 谱图计算 (002) 晶面所得的晶面距离相符, 说明氧化锌纳米棒是沿着 [002] 方向生长的. 图 7(c) 为所选氧化锌纳米棒部分区域的电子衍射图, 可以看出制备的氧化锌纳米棒属于单晶六方纤锌矿结构并沿着 [002] 方向生长.

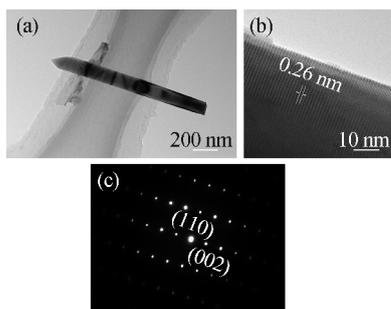


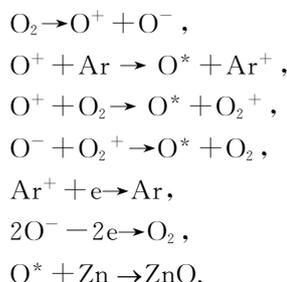
图 7 单根氧化锌纳米棒的 TEM 图和电子衍射图

Fig. 7 TEM images and electron diffraction pattern of a single ZnO nanorod

2.3 生长机制

采用本文方法制备的氧化锌纳米棒的形成包括成核和生长两个过程. 在最初的成核阶段, 金属锌在一定温度下形成锌蒸汽, 然后在基底上凝结成液滴并与氧气反应生成氧化锌核. 由文献报道可知一维氧化锌纳米材料主要是有气液固和气固两种生长机制^[24-27]. 在生长阶段, 生成的氧化锌核会向富氧区均匀延伸, 而这个延伸过程并没有催化剂的参与, 在 TEM 图中也没有在纳米棒的顶端发现催化剂的存在, 因此该生长过程不符合气液固生长机制而是属于气固生长机制. 气固生长机制的核心是前驱体在高温区蒸发然后在低温区沉积并形成纳米棒. 锌和氧化锌的熔点温度分别为 420 和 1 975 °C^[24-25]. 当反应温度达到锌的熔点温度 420 °C 时, 锌融化形成高温区, 然后在低温区沉积, 形成纳米棒, 所以反应温度高于 420 °C (450 和 500 °C) 时才会形成高温区和低温区, 属于气固生长机制. 而这两个温度并没有达到氧化锌的熔点温度. 此结果与 XRD 谱图中在 450 和 500 °C 下合成的氧化锌的衍射峰与六方纤锌矿晶体结构匹配的结果一致.

等离子体在氧化锌纳米棒的合成过程中起到重要作用, 本研究通过等离子体活化增强反应物的活性使反应更容易进行. 金属锌在适当的温度条件下加热, 形成锌蒸汽并在锌箔表面凝结成金属颗粒; 然后在 O₂-Ar 气氛中, 在等离子体放电过程中 O₂ 能有效地电离为 O⁺、O₂⁺ 离子, 而不用通过高温使 O₂ 电离, 这可以有效地降低反应温度; 电离后的 O⁺ 等在氩气辅助下会被等离子体转化为活化的氧原子并与锌反应生成氧化锌核, 再向富氧的区域延伸, 形成氧化锌纳米棒. 在生长过程中发生的详细化学反应描述如下:



其中 O* 代表活化的氧原子, 反应原理如图 8 所示.

3 结 论

本研究提出的等离子体增强热氧化法, 在温度低于熔点温度 420 °C 时反应不属于气固生长机制, 当温度高于 420 °C 时反应属于气固生长机制, 形成高温区

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

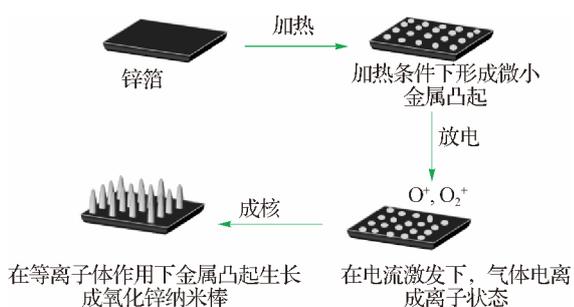


图 8 在等离子体下合成氧化锌纳米棒的生长过程的示意图

Fig.8 Schematic illustration of the growth process for the zinc oxide nanorods produced under the plasma

和低温区,利于纳米棒的形成,所以温度越高生长的纳米棒越长.当氩气与氧气流量比为 9 : 1 时才能够长出氧化锌纳米棒,是因为氧气过量时,会存在一部分氧气没有电离,而直接将金属锌表面氧化,不易生成氧化锌纳米棒.当电流越大,等离子体提供的能量越多,越有利于氧气化学键的断裂,因此在同样的温度和生长时间下纳米棒生长得更快.

通过实验结果得出基于等离子体增强热氧化法制备氧化锌纳米棒的特点如下:

- 1) 在等离子体放电过程中可生成活性高的氧的离子形态,因而不需要将表面加热到高温使 O_2 发生电离;
- 2) 等离子体可以产生很强的电场,从而有效地引导氧化锌纳米棒的生长;
- 3) 等离子体通过生成的氧原子的复合、离子轰击和中和,在局域提供了有效的表面加热,从而促进表面过程的进行;
- 4) 等离子体还可以通过离子轰击和其他等离子体相关效应产生局部成核点,可避免金属催化剂的使用;
- 5) 氧化锌纳米材料的形貌、直径可以通过工艺参数有效地控制.

参考文献:

[1] REN S, BAI Y F, CHEN J, et al. Catalyst-free synthesis of ZnO nanowire arrays on zinc substrate by low temperature thermal oxidation[J]. Mater Lett, 2007, 61: 666-670.

[2] ZHANG Y S, YU K, JIANG D S, et al. Zinc oxide nanorod and nanowire for humidity sensor [J]. Appl Surf Sci, 2005, 242(1): 212-217.

[3] CHOOPUN S, TUBTIMTAE A, SANTHAVEESUK T, et al. Zinc oxide nanostructures for applications as ethanol sensors and dye-sensitized solar cells[J]. Appl Surf Sci, 2009, 256(4): 998-1002.

[4] DAI Y, ZHANG Y, BAI Y Q, et al. Bicrystalline zinc oxide nanowires[J]. Chem Phys Lett, 2003, 375(1): 96-101.

[5] HO S T, WANG C Y, LIU H L, et al. Catalyst-free selective-

area growth of vertically aligned zinc oxide nanowires[J]. Chem Phys Lett, 2008, 463(1): 141-144.

[6] SEKAR A, KIM S H, UMAR A, et al. Catalyst-free synthesis of ZnO nanowires on Si by oxidation of Zn powders[J]. J Cryst Growth, 2005, 277(1): 471-478.

[7] SHEN G Z, BANDO Y, LIU B D, et al. Characterization and field-emission properties of vertically aligned ZnO nanonails and nanopencils fabricated by a modified thermal-evaporation process[J]. Adv Funct Mater, 2006, 16(3): 410-416.

[8] GHOSHAL T, BISWAS S, KAR S, et al. Direct synthesis of ZnO nanowire arrays on Zn foil by a simple thermal evaporation process [J]. Nanotechnology, 2008, 19 (6): 065606.

[9] DING Y, WANG Z L. Electron energy-loss spectroscopy study of ZnO nanobelts[J]. J Electron Microsc, 2005, 54 (3): 287-291.

[10] HSUEH T J, HSU C L. Fabrication of gas sensing devices with ZnO nanostructure by the low-temperature oxidation of zinc particles [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 131(2): 572-576.

[11] KODAMBAKA S, TERSOFF J, REUTER M C, et al. Germanium nanowire growth below the eutectic temperature[J]. Science, 2007, 316(5825): 729-732.

[12] YANG R S, WANG Z L. Interpenetrative and transverse growth process of self-catalyzed ZnO nanorods[J]. Solid State Communications, 2005, 134(11): 741-745.

[13] LIANG H Q, PAN L Z, LIU Z J. Synthesis and photoluminescence properties of ZnO nanowires and nanorods by thermal oxidation of Zn precursors [J]. Mater Lett, 2008, 62(12): 1797-1800.

[14] JEONG M C, OH B Y, LEE W, et al. Comparative study on the growth characteristics of ZnO nanowires and thin films by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) [J]. J Cryst Growth, 2004, 268(1/2): 149-154.

[15] CHA S N, SONG B G, JANG J E, et al. Controlled growth of vertically aligned ZnO nanowires with different crystal orientation of the ZnO seed layer[J]. Nanotechnology, 2008, 19(23): 235601.

[16] KIM S, JEONG M C, OH B Y, et al. Fabrication of Zn/ZnO nanocables through thermal oxidation of Zn nanowires grown by RF magnetron sputtering[J]. J Cryst Growth, 2006, 290(2): 485-489.

[17] FENG L B, LIU A H, LIU M, et al. Synthesis, characterization and optical properties of flower-like ZnO nanorods by non-catalytic thermal evaporation[J]. J Alloys Compd, 2010, 492(1): 427-432.

[18] ELHAG S, IBUPOTO Z H, KHRANOVSKYY V, et al.

- Habit-modifying additives and their morphological consequences on photoluminescence and glucose sensing properties of ZnO nanostructures, grown via aqueous chemical synthesis[J]. *Vac*, 2015, 116: 21-26.
- [19] KONGJAI K, CHOOPUN S, HONGSITH N, et al. Zinc oxide whiskers by thermal oxidation method[J]. *Chiang Mai J Sci*, 2011, 38(1): 39-46.
- [20] LEE S H, LEE S W, OH T, et al. Direct observation of plasmon-induced interfacial charge separation in metal/semiconductor hybrid nanostructures by measuring surface potentials[J]. *Nano Lett*, 2018, 18(1): 109-116.
- [21] BAO Y, WANG C, MA J Z. A two-step hydrothermal route for synthesis hollow urchin-like ZnO microspheres[J]. *Ceram Int*, 2016, 42(8): 10289-10296.
- [22] ZHONG M, GUO W M, LI C L, et al. Morphology-controllable growth of vertical ZnO nanorod arrays by a polymer soft template method: growth mechanism and optical properties[J]. *J Alloys compd*, 2017, 725: 1018-1026.
- [23] MAO C Y, XIANG Y M, LIU X M, et al. Photo-inspired antibacterial activity and wound healing acceleration by hydrogel embedded with Ag/Ag@AgCl/ZnO nanostructures [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(9): 9010-9021.
- [24] ZHANG Y, JIA H B, LUO X H, et al. Synthesis, microstructure, and growth mechanism of dendrite ZnO nanowires[J]. *J Phys Chem B*, 2003, 107(33): 8289-8293.
- [25] CHENG Q J, OSTRIKOV K K. Temperature-dependent growth mechanisms of low-dimensional ZnO nanostructures [J]. *CrystEngComm*, 2011, 13(10): 3455.
- [26] OSTRIKOV K K, LEVCHENKO I, CVELBAR U, et al. From nucleation to nanowires: a single-step process in reactive plasmas[J]. *Nanoscale*, 2010, 2(10): 2012-2027.
- [27] CHEN W Z, WANG B B, QU Y Z, et al. Catalyst-free growth and tailoring morphology of zinc oxide nanostructures by plasma-enhanced deposition at low temperature[J]. *J Nanopart Res*, 2017, 19(3): 95.

Synthesis and reaction mechanism of zinc oxide nanorods produced by plasma-enhanced thermal oxidation

GUO Bin^{1,2}, FU Junchi^{1,2}, QU Yazhou¹, CHENG Qijin^{1,2*}

(1. College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

2. Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518000, China)

Abstract: A new method of plasma thermal oxidation (i. e., custom-made plasma-enhanced horizontal tube furnace deposition system) was used to fabricate ZnO nanorods under the discharge of oxygen and argon gases. The morphology and microstructure of the synthesized single-crystal ZnO nanorods could be controlled by changing the reaction temperature, the gas flow rate ratio of argon to oxygen, as well as the discharge current. It was found that, when the reaction temperature was 500 °C and the argon to oxygen flow ratio was 9 : 1, uniform ZnO nanorods were formed, and the synthesized ZnO nanorods grew longer with the increase in the discharge current. In addition, a growth mechanism for the synthesis of ZnO nanorods under the plasma condition was proposed. The growth process is that the metal zinc is heated at a suitable temperature to form zinc vapor and condensed into metal particles on the surface of zinc foil. Then in O₂-Ar atmosphere, O₂ can be effectively ionized into O⁺, O₂⁺ ions during the plasma discharge process. The ionized oxygen ions can be transformed into activated oxygen by plasma assisted by argon, and then reacts with zinc to form a ZnO nucleus and extends to the oxygen enriched region to form ZnO nanorods.

Keywords: ZnO; plasma; nanorods; growth mechanism; thermal oxidation