

The Preparation of Silver Nanowires with High Yield and Research of Thin Film Performance

Dongzhou Zhong^{1*}, Feng Duan^{1,2}, Shuying Zhang², Weijia Yang², Xin He²

¹Information Engineering College, Wuyi University, Jiangmen Guangdong

²Applied Physics and Materials Institute, Wuyi University, Jiangmen Guangdong

Email: *dream_yu2002@126.com

Received: Jan. 24th, 2018; accepted: Feb. 16th, 2018; published: Feb. 23rd, 2018

Abstract

In this paper, the high yield metal silver nanowires were prepared by hydrothermal method with silver nitrate as the silver source, the surfactant polyvinylpyrrolidone as the topical guide, and the iron compound as the reactant. The best preparation of silver nanowire was screened by hydrothermal conditions such as reactant concentration, reactant type and mole ratio. The silver nanowires obtained with the optimum ratio hydrothermal method were compared with the silver nanowires obtained by the oil bath method. And the structure and purity of the samples were analyzed by using X-ray diffraction instruments. Some transparent conductive film was prepared by using silver nanowires with different diameters. The photoelectric properties of the films were characterized by UV visible spectrophotometer and four-probe tester. The transparent conductive films with better electrical properties can be obtained by using a nanowire with excellent long diameter ratio at the same transmittance.

Keywords

Silver Nanowires, Hydrothermal Method, Oil Bath, Conductive Films

高产率金属银纳米线的制备其薄膜性能研究

钟东洲^{1*}, 段峰^{1,2}, 张舒颖², 杨为家², 何鑫²

¹五邑大学信息工程学院, 广东 江门

²五邑大学应用物理与材料学院, 广东 江门

Email: *dream_yu2002@126.com

收稿日期: 2018年1月24日; 录用日期: 2018年2月16日; 发布日期: 2018年2月23日

*通讯作者。

摘要

本文利用水热法制备高产率金属银纳米线,以硝酸银为银源,表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮为形貌导向剂,以铁的化合物为反应物。通过研究水热法条件,如反应物浓度、反应物种类和摩尔比等对纳米线产率和尺度的影响,筛选出最好的制作银纳米线方案。并将使用最佳配比水热法获得的银纳米线与油浴法获得的银纳米线相比较,利用X射线衍射仪表征样品的结构与纯度。利用不同长径比的银纳米线制备透明导电薄膜,利用紫外可见分光光度计和四探针测试仪表征薄膜的光电性能,在相同透过率的情况下,利用长径比更高的纳米线可获得电学性能更为优异的透明导电薄膜。

关键词

银纳米线, 水热法, 油浴法, 导电薄膜

Copyright © 2018 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

由于科学技术的快速发展,智能手机、电子书、LED显示器等大量的光电器件进入了人们的日常生活。根据权威统计结果显示全球大约有30亿人在使用手机,人们对电子产品的需求日益增加,同时对光电器件的性能要求也越来越高。其中透明电极是光电器件的重要部件,随着对光电器件性能要求的提升,透明导电薄膜技术得到飞速发展[1][2]。透明导电薄膜是一种导电性能和透过率高的光电材料,当前市场上应用最广泛的透明导电薄膜是以氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)为导电材料的金属氧化物,例如ITO透明导电薄膜在2012年占整个市场份额的94%,且需求量持续增长[3][4][5]。但是随着柔性光电器件的发展,ITO也面临着不可忽视的问题和缺陷,例如主要的金属原材料铟(In)是一种不可再生的资源,且储藏量有限,同时ITO需要在条件苛刻环境中(如高温和真空)获得,对工艺和设备要求非常高,导致ITO价格成本居高不下;随着市场对ITO需求量的快速增长,导致金属铟供不应求,使ITO不能正常供应市场,科研人员研究寻找可以替代ITO的导电材料[6][7][8][9]。其次,ITO透明导电薄膜在弯曲时容易破碎,陶瓷性能明显,不适合用来制作柔性器件,无法满足未来光电器件对透明导电薄膜提出的性能要求。因此,开发出高性能导电薄膜替代ITO势在必行[10]-[15]。

目前,替代ITO新型透明导电薄膜材料主要有石墨烯、金属纳米线(金、银纳米线)、导电聚合物等[16][17]。石墨烯虽然具有较高的电子迁移率,但大面积高质量石墨烯的制备依然存在较大困难,且生长条件对于衬底的耐温性要求较高,石墨烯片内缺陷较多,片间接触电阻较大,限制其在诸多光电器件中的应用,此问题也同样存在于碳纳米管基透明导电薄膜中;导电聚合物则存在高温高湿度和紫外辐射等条件下电学性能不稳定等问题。其中金属纳米线由于具有优异的光学性能,制作工艺简单,可室温成膜,且能与柔性衬底兼容等优点,被认为是最具潜力的可替代ITO的材料[18]。

如何通过简单的液相法制备较高产率和长径比的金属纳米线,是获得光电性能优异透明导电薄膜的重要前提[19]。因此,本论文利用研究了水热法中反应物浓度、反应物种类和摩尔比等实验参数对银纳米线产率和尺度的影响,获得最优化制备工艺。并且比较了水热法和油浴法所制备的银纳米线构建薄膜的光电性能,在相同透过率的情况下,高长径比有利于获得更优异的导电性薄膜。水热法,是指一种在密

封的压力容器中，以水作为溶剂、粉体经溶解和再结晶的制备材料的方法。水热法的优点有：可以制备生长缺陷极少、取向好的晶体，且合成产物结晶度高以及易于控制产物晶体的粒度，所得到的粉末纯度高、分散性好、均匀、分布窄、无团聚、晶型好、形状可控、利于环境净化等。其缺点有：水热法需要高温高压步骤，使其对生产设备的依赖性比较强，这也影响和阻碍了水热法的发展[20]。油浴就是使用油作为热浴物质的热浴方法。一般情况下，待加热的物质通常置于容器内，容器置于热源，油浴常用的介质有豆油、棉籽油等。油浴最高温度比水浴高，一般在 100℃~250℃之间有些容器，如玻璃容器和陶瓷容器，若直接置于热源上，则往往因受热不均，温升过快，产生炸裂，或传热不良，以致加热物质受热不均匀[21]。

2. 实验部分

2.1. 水热法制备银纳米线

取 0.7206 g 葡萄糖溶于 40 mL 蒸馏水中，量取 0.5096 g 硝酸银溶于 20 mL 蒸馏水中，量取 0.015 g 硫酸铁溶于 40 mL 蒸馏水。取溶解后的葡萄糖溶液 20 mL、硝酸银溶液 10 mL 和硫酸铁溶液 20 mL 混合均匀，随后将 2.5 g 聚乙烯吡咯烷酮(PVP, K30)倒入混合液中至完全溶解。将混合物转移至反应釜中，在 180℃下恒温反应 6 h。反应完成后，用醋酸和去离子水 1:1 混合的溶液处理 30 min，再利用乙醇多次离心，最后进行抽滤得到长径比较长的银纳米线沉淀物。

2.2. 油浴法制备银纳米线

取 0.011947 g 的 1-丁基-3-甲基咪唑氯化盐(BMIM-Cl)和 0.387 g 的 PVP(K30)溶解于 50 mL 的丙二醇中，将混合溶液转移至圆底烧瓶中，在 90℃下搅拌至混合均匀。取 3.2275 g 的 AgNO₃ 溶解于 20 mL 蒸馏水中，得到浓度为 0.95 mol/L 的 AgNO₃ 溶液，将 2.4 mL 的 AgNO₃ 注入到混合溶液中，继续反应 24 h。反应完成后，用醋酸和去离子水 1:1 混合的溶液处理 30 min，再利用乙醇多次离心，最后进行抽滤得到长径比较长的银纳米线沉淀物。

2.3. 表征测试

利用 X 射线衍射仪(X'pert Pro MFD, Panalytical, 荷兰)表征透明导电薄膜的结构与组成；利用场发射扫描电子显微镜(FESEM, Nova NanoSEM 430, FEI, 美国)观测薄膜表面形貌；利用数字式四探针测试仪(SZ-82, Suzhou Telecommunication, 中国)表征薄膜的面电阻，采取多点测试取平均值；利用紫外可见分光光度计(UV2550, Shimadzu, 日本)表征透明薄膜的光学透过率。

3. 结果与讨论

3.1. 水热法制备银纳米线配比探究

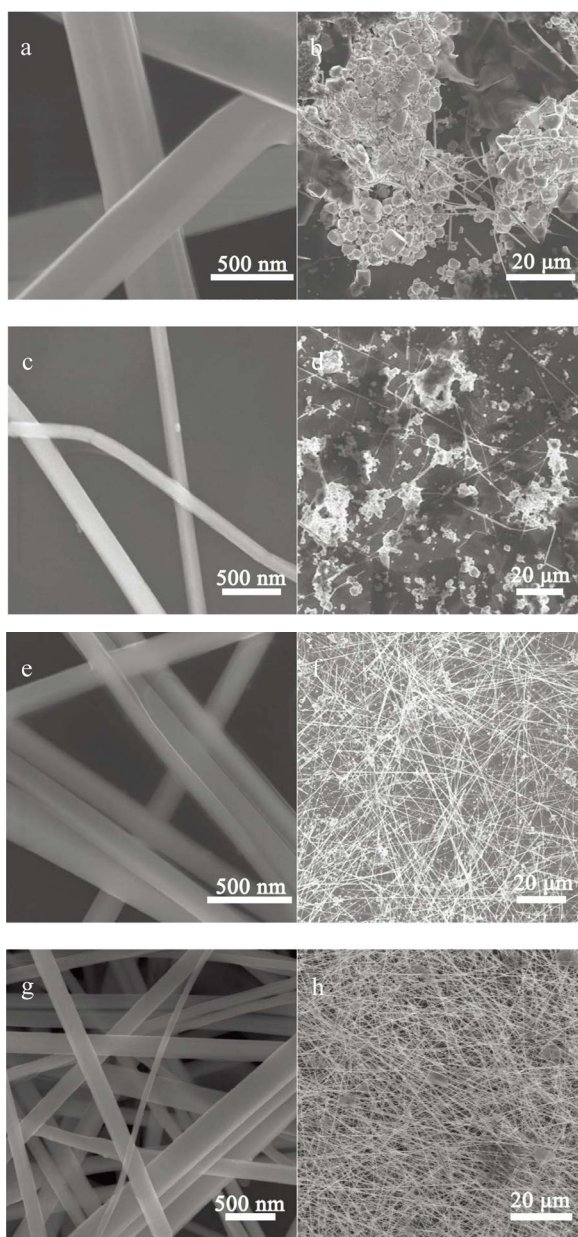
3.1.1. 不同铁的化合物对银纳米线产率和尺度的影响

为了研究铁的化合物对纳米线产率和尺度的影响，选择 FeCl₃、FeCl₂、FeSO₄、Fe₂(SO₄)₃ 四种不同的铁的化合物，保证铁的摩尔量不变，其质量分别为 0.19464 g、0.23857 g、0.3336 g、0.2398 g，其他条件保持不变，观察铁的化合物对所得纳米线的产率和尺度的影响。表 1 为添加不同铁的化合物所制备样品需要的试剂配比。

图 1 为利用 FeCl₃、FeCl₂、FeSO₄、Fe₂(SO₄)₃ 所制备的银纳米线 SEM 低倍和高倍形貌图。如图 1(a) 和图 1(b) 所示，以 FeCl₃ 为反应物时，所得纳米线的产率不高，纳米线的直径为 0.3~0.5 μm，长度为 50 μm 左右，所得纳米线的尺寸均匀性相对较差，且产物中存在许多大颗粒，不利于制备光电性能优良的透明

Table 1. The reagent ratio of samples prepared by different iron compounds**表 1.** 不同铁的化合物所制备样品的试剂配比

化学试剂	FeCl ₃	FeCl ₂	FeSO ₄	Fe ₂ (SO ₄) ₃	AgNO ₃	C ₆ H ₁₂ O ₆	PVP K30
物质的量浓度(mol/L)	0.03	0.03	0.03	0.015	0.15	0.1	-
蒸馏水体积(mL)	40	40	40	40	20	40	-
质量(g)	0.19464	0.23857	0.3336	0.2398	0.5096	0.7206	2.5

**Figure 1.** The SEM low and high topography of the products were prepared by adding FeCl₃ (a, b), FeCl₂ (c, d), FeSO₄ (e, f), and Fe₂(SO₄)₃ (g, h)**图 1.** 添加 FeCl₃ (a, b)、FeCl₂ (c, d)、FeSO₄ (e, f)、Fe₂(SO₄)₃ (g, h) 不同铁化合物所制备出产品的 SEM 低倍和高倍形貌图

导电薄膜。图 1(c)和图 1(d)为以 FeCl_2 为反应物所得产物的 SEM 图, 纳米线的产率有所提高, 直径为 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$, 长度为 $100\ \mu\text{m}$ 左右。由此可见以 FeCl_3 和 FeCl_2 作为反应物制备出的产物具有相似的形貌。图 1(e)和图 1(f)为以 FeSO_4 为反应物所得产物的 SEM 图, 纳米线的产率明显提高, 直径也降低到 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$, 长度增加到 $100\sim 150\ \mu\text{m}$ 。图 1(g)和图 1(h)为以 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 为反应物所得产物的 SEM 图, 可见所得产物均为高长径比的纳米线, 且直径较为均匀, 在 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 范围内, 长度为几百微米。由此可见, 铁的化合物种类对所得纳米线的产率和尺寸都有重要影响, 其中用 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 作为反应物所制备的纳米线杂质最少, 且纳米线长径比较高, 尺寸较为均匀, 产率比其他三种铁的化合物都高。

3.1.2. 不同 PVP 浓度对银纳米线产率和尺度的影响

为了研究 PVP 浓度对纳米线产率和尺度的影响, 选择以 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 作为反应物, 改变所添加 PVP 的质量, 分别为 $1\ \text{g}$ 、 $1.5\ \text{g}$ 、 $2\ \text{g}$ 、 $2.5\ \text{g}$, 其他条件保持不变, 观察 PVP 的浓度对所得纳米线的产率和尺度的影响。表 2 为添加不同 PVP 浓度所制备样品需要的试剂配比。

图 2(a)~(h)为添加 PVP 质量分别为 $1\ \text{g}$ 、 $1.5\ \text{g}$ 、 $2\ \text{g}$ 、 $2.5\ \text{g}$ 时所得产物的 SEM 低倍和高倍形貌图。如图 2(a)和图 2(b)所示, 当 PVP 的添加量为 $1\ \text{g}$ 时, 产物中纳米线的产率极低。随着 PVP 的添加量增加到 $1.5\ \text{g}$ 时, 一维结构的纳米粒子数量增加, 但同时也出现了较多不规则的纳米粒子, 如图 2(c)和图 2(d)所示。当 PVP 的添加量继续增加后, 产物中纳米线的产率得到极大的提高。图 2(e)和图 2(f)表明当 PVP 的添加量为 $2\ \text{g}$ 时, 所得纳米线的直径为 $0.2\sim 0.4\ \mu\text{m}$, 长度为 $50\ \mu\text{m}$ 左右。但纳米线表面存在少量纳米颗粒, 使得表面光滑度降低。图 2(g)和图 2(h)显示当 PVP 的添加量增加至 $2.5\ \text{g}$ 时, 纳米线的产率大大提高, 所得纳米线直径为 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$, 长度可达几百微米, 且纳米线表面非常光滑。

由此可见, 随着 PVP 的添加量的增加, 纳米线的产率逐渐提高, 如进一步增加 PVP 的量, 将会导致 PVP 无法完全溶解在反应物溶液中, 不利于均匀反应的进行。PVP 在纳米线的制备过程中, 通常认为是一维纳米结构的形貌导向剂, 由于纳米晶体不同晶面对有机表面活性剂的吸附能不同, 导致不同晶面的生长速率有所差异, 最终形成取向生长的一维纳米结构。如 PVP 的添加量较低, 则不能有效对纳米晶进行吸附, 控制其取向生长; 随着 PVP 浓度的增加, 纳米晶的分散性和吸附量都有所增加, 一维纳米结构的产率也随之增加。

3.1.3. 不同硝酸银浓度对银纳米线产率和尺度的影响

为了研究硝酸银浓度对纳米线产率和尺度的影响, 选择以 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 作为反应物, 添加 $2.5\ \text{g}$ 的 PVP, 添加不同浓度的硝酸银, 其他条件保持不变, 观察硝酸银的浓度对所得纳米线的产率和尺度的影响。表 3 为添加不同硝酸银浓度所制备样品需要的试剂配比。

图 3(a)~(h)为硝酸银浓度分别为 $0.15\ \text{mol/L}$ 、 $0.1\ \text{mol/L}$ 、 $0.075\ \text{mol/L}$ 和 $0.05\ \text{mol/L}$ 时所得产物的 SEM 低倍和高倍形貌图。如图 3(a)和图 3(b)所示, 当硝酸银的浓度为 $0.15\ \text{mol/L}$ 时, 生成了直径为 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$, 长度为 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 的纳米线, 但纳米线的产率较低。随着硝酸银的浓度降低至 $0.1\ \text{mol/L}$ 时, 纳米线的尺

Table 2. Sample preparation of samples with different PVP concentrations

表 2. 不同 PVP 浓度样品所制备样品的试剂配比

化学试剂	AgNO_3	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	PVP K30			
物质的量浓度(mol/L)	0.075	0.1	0.015	-	-	-	-
蒸馏水体积(mL)	20	40	40	-	-	-	-
质量(g)	0.2548	0.7206	0.2398	1	1.5	2	2.5

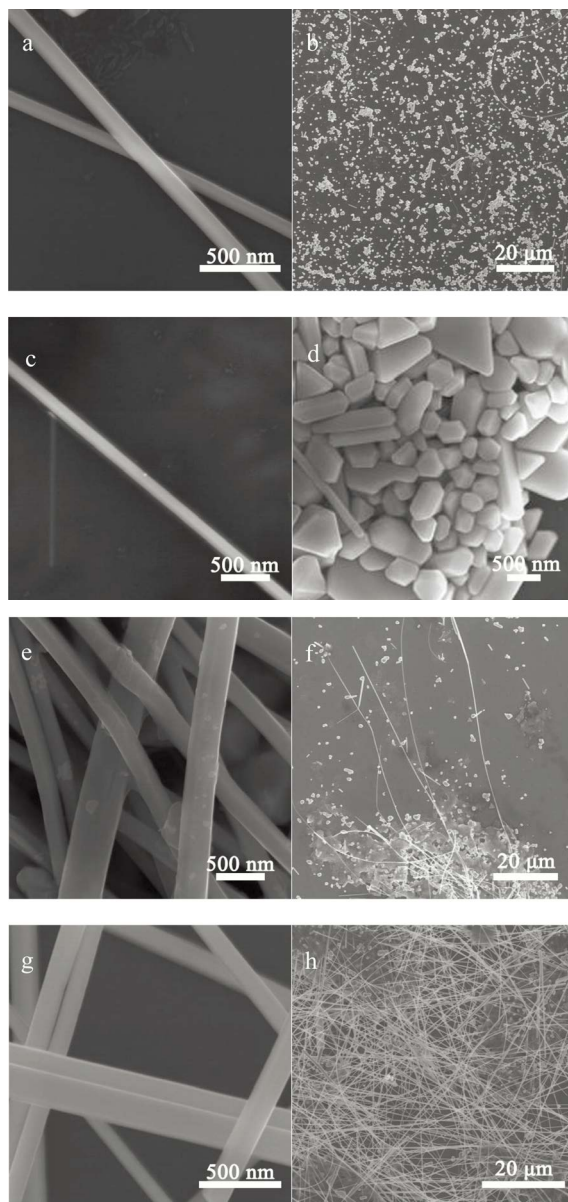


Figure 2. SEM low and high topography of the products were prepared by adding PVP quality of 1 g (a, b), 1.5 g (c, d), 2 g (e, f) and 2.5 g (g, h)

图 2. 添加 PVP 质量分别为 1 g (a, b)、1.5 g (c, d)、2 g (e, f) 和 2.5 g (g, h) 所制备出产物的 SEM 低倍和高倍形貌图

Table 3. The reagent ratio of the samples prepared by different concentrations of silver nitrate
表 3. 不同浓度硝酸银所制备样品的试剂配比

化学药品	AgNO ₃				C ₆ H ₁₂ O ₆	Fe ₂ (SO ₄) ₃	PVP K30
物质的量浓度(mol/L)	0.15	0.1	0.075	0.05	0.1	0.015	-
蒸馏水体积(mL)	20	20	20	20	40	40	-
质量(g)	0.5096	0.3397	0.2548	0.1699	0.7206	0.2398	2.5

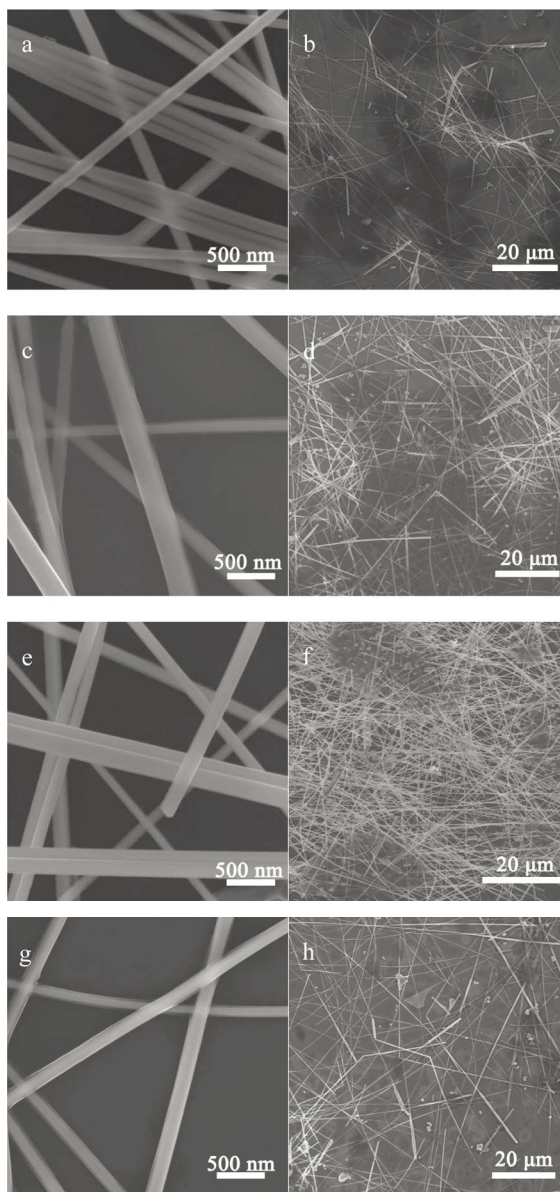


Figure 3. The SEM low and high topography of the concentration of silver nitrate was 0.15 mol/L (a, b), 0.1 mol/L (c, d), 0.075 mol/L (e, f), and 0.05 mol/L (g, h) to produce SEM low and high magnification

图 3. 硝酸银浓度分别为 0.15 mol/L (a, b)、0.1 mol/L (c, d)、0.075 mol/L (e, f) 和 0.05 mol/L (g, h) 所制备出产物的 SEM 低倍和高倍形貌图

度和产率并未有明显改变，如图 3(c) 和图 3(d) 所示。随着硝酸银的浓度降低至 0.075 mol/L 时，纳米线的产率极大地提高，纳米线的直径为 0.1~0.3 μm，长度可达几百微米，如图 3(e) 和图 3(f) 所示。但继续降低硝酸银的浓度，纳米线的产率有所降低。

综合以上结果分析可知，反应化合物的种类和浓度、有机表面活性剂的质量等对所得纳米线的产率和尺度均有重要的影响。利用此水热法制备高产率纳米线的最适合的条件是：以 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 作为反应物，加入 2.5 g 的 PVP、0.075 mol/L 的硝酸银和 0.1 mol/L 的葡萄糖。

3.2. 银纳米线的结构表征和薄膜性能研究

为了研究不同长径比纳米线对光电薄膜性能的影响, 本文利用油浴法制备了银纳米线以作为比较。图 4 为利用水热法和油浴法所制备纳米线的 XRD 图谱, 其中红色曲线为水热法所制备银纳米线的 XRD 图谱, 绿色曲线图谱为油浴法所制备银纳米线的 XRD 图谱, 蓝色曲线图谱为面心立方单质 Ag 的 XRD 标准谱。从图中可知, 在两种样品的 XRD 图谱中均可观察到四个衍射峰, 其 2θ 分别为 38.12° 、 44.32° 、 65.54° 和 77.40° 时, 与 Ag 的 XRD 标准谱(01-087-0597Ag)一致, 相对应的衍射晶面分别为(111)、(200)、(220)和(311), 这表明了用这两种方法制备的纳米线均为具有面心立方结构的单质 Ag, 且无其他峰出现, 说明制备出来的产物纯度较高。还有一点需要注意的是(111)和(200)的衍射峰强度之比标准卡片值为 2.5, 从图中观察到水热法制备的银纳米线和油浴法制备的银纳米线在(111)和(200)的衍射峰强度之比超过 4.0, 表明所制备的纳米结构沿(111)方向取向生长。

为了制备银纳米线光电薄膜, 利用旋涂法在柔性衬底聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)表面构建导电薄膜。镀膜前先将衬底进行紫外辐射处理, 可提高银纳米线对衬底的粘附性。旋涂仪设置为低速 2000 r/min, 时间 5 s; 高速 4500 r/min, 时间 20 s。将所制备的银纳米线薄膜在机械压力 10 MPa 下层压 3 min, 获得纳米线之间联系紧密的导电网络。图 5 为利用水热法和油浴法所制备银纳米线薄膜的光学透过率谱, 以基片为参考, 在波长为 550 nm 时, 透过率分别为 89.56% 和 90.67%。图 5 的插入图为两种方法制得的银纳米线 SEM 形貌图。可见利用水热法所制得的银纳米线直径为 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$, 长度可达几百微米; 油浴法所制得的银纳米线直径为 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$, 长度为 $50\ \mu\text{m}$ 左右。

利用四探针测试薄膜的导电性能, 取薄膜的不同位置测试其方块电阻值, 方阻指一个正方形的薄膜导电材料边到边之间的电阻, 在一长为 L , 宽为 W , 高为 d (即膜的厚度) 的薄膜上, 此时 $L = l$, $S = w*d$, 故 $R = \rho*l/(w*d) = (\rho/d)*(l/w)$ 。令 $l = w$ 于是 $R = (\rho/d)$ 。

数据如表 4 所示。在透过率差不多的情况下, 长径比越高的银纳米线有利于减少透明导电薄膜的方阻, 这是因为长径比越高的银纳米线所形成导电网络的结点数相对较少, 可获得优良的导电通道。

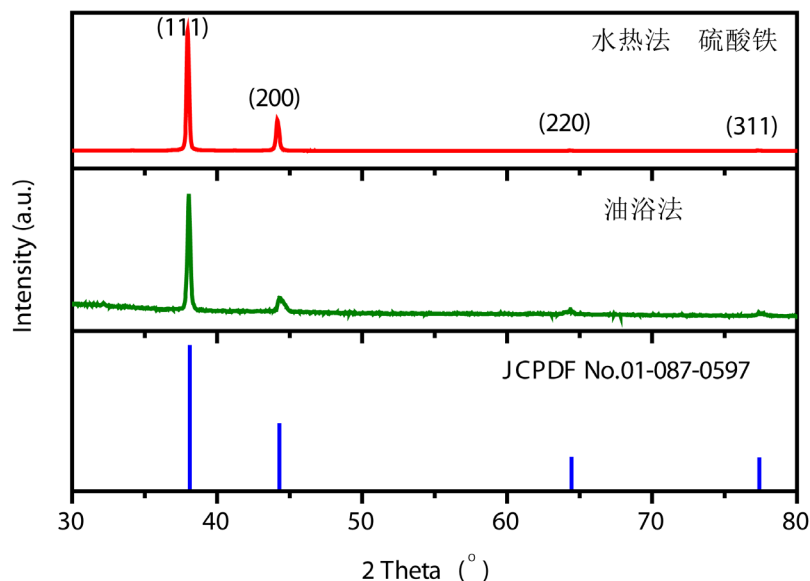
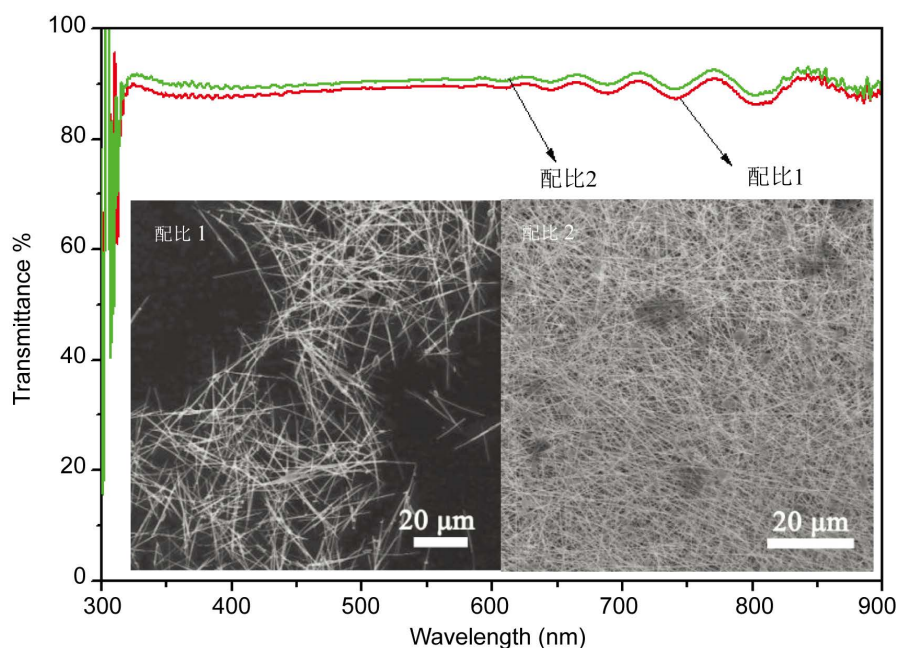


Figure 4. Hydrothermal method with oil bath method of silver nanowires and standard silver piece of XRD spectrum, the range of $30^\circ\sim 80^\circ$

图 4. 水热法与油浴法制作的银纳米线和标准银卡片 XRD 图谱, 其范围为 $30^\circ\sim 80^\circ$

Table 4. Permeability and resistance data of different silver nanowire films**表 4.** 不同银纳米线薄膜的透过率与方阻数据

测试点	方阻(Ω/\square)				
	1	2	3	4	5
水热法(89.56%)	0.3	0.7	0.6	0.9	0.8
油浴法(90.67%)	15	10	10.9	12	14

**Figure 5.** The transmittance curve of silver nanowires films by hydrothermal method and oil bath method; Insert the picture of silver nanowire SEM**图 5.** 利用水热法和油浴法制备银纳米线薄膜的透过率曲线；插入图为银纳米线 SEM 形貌图

4. 结论

本文利用水热法制备了高产率的金属银纳米线，并通过探讨反应物浓度、反应物种类和摩尔比等实验参数对银纳米线产率和尺度的影响，获得产率最高，长径比最大的银纳米线优化制备工艺参数。通过比较水热法和油浴法所制备不同尺度的银纳米线构建的薄膜性能，得出长径比越高的纳米线可获得导电性能更为优异的光电薄膜。

基金项目

国家自然科学基金(NO: 61475120)和广东省普通高校特色创新类项目(NO: 2015KTSCX146)资助。

参考文献 (References)

- [1] He, X., Zhang, M. and Yang, S.Y. (2012) Large Scale Synthesis of Silver Nanowires with High Aspect Ratios by Glucose and Fe^{3+} . *Advanced Materials Research*, **529**, 541-545. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.529.541>
- [2] Karakawa, M., Tokuno, T., Nogi, M., Aso, Y. and Suganuma, K. (2017) Silver Nanowire Networks as a Transparent Printable Electrode for Organic Photovoltaic Cells. *Electrochemistry*, **85**, 245-248. <https://doi.org/10.5796/electrochemistry.85.245>

- [3] Chung, W.-H., Kim, S.-H. and Kim, H.-S. (2016) Welding of Silver Nanowire Networks via Flash White Light and UV-C Irradiation for Highly Conductive and Reliable Transparent Electrodes. *Nature*, **4**, Article ID: 32086. <https://doi.org/10.1038/srep32086>
- [4] Liang, J.J., Li, L., Chen, D., Hajagos, T., Ren, Z., Chou, S.-Y., Hu, W. and Pei, Q.B. (2015) Intrinsically Stretchable and Transparent Thin-Film Transistors Based on Printable Silver Nanowires, Carbon Nanotubes and an Elastomeric Dielectric. *Nature Communications*, **6**, Article ID: 7647. <https://doi.org/10.1038/ncomms8647>
- [5] Liu, Y., Zhang, J.M., Gao, H., Wang, Y., Liu, Q.X., Huang, S.Y., Guo, C.F. and Ren, Z.F. (2017) Capillary Force Induced Cold Welding in Silver-Nanowire-Based Flexible Transparent Electrodes. *Nano Letters*, **1**, 2-6.
- [6] Park, J.H., Hwang, G.-T., Kim, S., Seo, J., Park, H.-J., Yu, K., Kim, T.-S. and Lee, K.J. (2016) Flash-Induced Self-Limited Plasmonic Welding of Silver Nanowire Network for Transparent Flexible Energy Harvester. *Advanced Materials*, **3**, 473.
- [7] 王洁, 堵永国, 张楷力. 银纳米线透明电极的成膜及后处理综述[J]. 贵金属, 2016, 37(3): 1-2.
- [8] 刘裕堃, 曹峰, 胡超, 秦天柱, 赵博为, 何桂美, 王娟. 银纳米线的溶剂热法制备及表征[J]. 化学生物与工程, 2017, 34(7): 35-37, 42.
- [9] 李云飞, 冯晶. 还原石墨烯氧化物 - 银纳米线复合电极的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015: 1-16.
- [10] 鲍俊, 杜晓晴. 石墨烯/银纳米线复合透明电极的制备及其在有机电致发光器件中的应用[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [11] 李志凌, 李晶泽, 王悦辉. 纳米银线 - 石墨烯基柔性透明导电薄膜的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [12] 郑璐, 晋日亚. 石墨烯/银纳米复合材料的制备及其电化学应用研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2016.
- [13] 张骐, 郭金宝. 石墨烯/银纳米线复合透明电极材料的制备及液晶器件应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [14] 钱君芝, 张丽. 石墨烯 - 银纳米复合材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- [15] 李云飞, 陈洋, 毕宴钢, 纪一鹏, 曾祥雯, 李阳, 程为军, 胡腾飞, 杨继萍, 杨海, 李传南. 还原石墨烯氧化物 - 银纳米线柔性复合电极的制备与性能研究[J]. 发光学报, 2015, 36(5): 545-551.
- [16] Liang, J.J., Li, L., Tong, K., Ren, Z., Hu, W., Niu, X.F., Chen, Y.S. and Pei, Q.B. (2014) Silver Nanowire Percolation Network Soldered with Graphene Oxide at Room Temperature and Its Application for Fully Stretchable Polymer Light Emitting Diodes. *ACS Nano*, **8**, 1590-1600.
- [17] Song, T.-B., Chen, Y., Chung, C.-H., Yang, Y., Bob, B., Duan, H.-S., Li, G., Tu, K.-N., Huang, Y. and Yang, Y. (2014) Nanoscale Joule Heating and Electromigration Enhanced Ripening of Silver Nanowire Contacts. *ACS Nano*, **8**, 2804-2811. <https://doi.org/10.1021/nn4065567>
- [18] Sciacca, B., van de Groep, J., Polman, A. and Garnett, E.C. (2015) Solution-Grown Silver Nanowire Ordered Arrays as Transparent Electrodes. *Advanced Materials*, **5**, 905-909.
- [19] Choi, S., Park, J., Hyun, W., Kim, J., Kim, J., Lee, Y.B., Song, C., Hwang, H.J., Kim, J.H., Hyeon, T. and Kim, D.-H. (2015) Stretchable Heater Using Ligand-Exchanged Silver Nanowire Nanocomposite for Wearable Articular Thermotherapy. *ACS Nano*, **9**, 6626-6633. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b02790>
- [20] 罗超, 戴英. 水热法制备银纳米线及其生长机制的研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2008, 27(6): 70-72.
- [21] 张卫纯, 樊济宇. 油浴中多羟基还原法快速合成银纳米线[J]. 材料导报, 2011(s2): 94-96.

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：2160-7567，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：app@hanspub.org