

无助剂合成纳米银线的制备方法综述

毛华明, 樊正阳, 陈 杰, 尹俊刚, 代 伟, 杨宏伟*
(昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 迄今为止, 银纳米线(AgNWs)可以常规合成。然而, 没有任何添加剂的 AgNWs 的制备尚未达到类似的控制水平, 其制备方法和控制机理一直是研究的重点和难点。在分析国内外近 20 年内 40 余篇相关文献的基础上, 总结了无助剂直接合成 AgNWs 的制备方法和控制机理, 主要包括多元醇法、晶种法、模板法、湿化学法、光还原法、电化学法和绿色合成法, 并对上述方法的优缺点进行了总结分析与展望。

关键词: 纳米银线; 无助剂; 制备方法; 多元醇法

中图分类号: O614.122; TB383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)02-0088-07

A review on synthesis methods of silver nanowires without auxiliary agents

MAO Hua-ming, FAN Zheng-yang, CEHN Jie, YIN Jun-gang, DAI Wei, YANG Hong-wei*
(State Key Laboratory of Advance Technologies for Comprehensive Utilization of Precious Metals,
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: To date, silver nanowires (AgNWs) can be routinely synthesized. However, the preparation of AgNWs without any additives has not yet reached a similar level of control, and its preparation method and control mechanism have always been the focus and difficulty of research. Based on the analysis of more than 40 related literatures in the past 20 years, the synthetic methods and control mechanism employed to prepare silver nanowires without auxiliary agents are summarized, including polyol method, seeded method, template method, wet chemical method, photo-reduction method, electrochemical reduction and green synthesis method. Their advantages and disadvantages of the above methods are summarized, analyzed and prospected.

Key words: silver nanowires; without auxiliary agent; synthetic methods; polyol method

银纳米线(AgNWs)是典型的一维金属纳米材料, 既有金属银的优良性质, 又有纳米小尺寸效应带来的独特光学性能和表面等离子体共振效应等性能, 因此在纳米电子学、能量转换、医疗保健、生物传感器和药物传递系统等领域具有重要应用^[1]。此外, AgNWs 还具有导电性高、透光性和弯折性好、成膜均匀以及制膜过程简单等特性, 因此可作为传统透明导电电极的替代材料, 在柔性显示屏、可穿戴电子产品、电子纸、太阳能电池等领域同样

具有良好的应用前景^[2-3]。

近年来, 研究人员提出了多种 AgNWs 的合成方法, 如多元醇法、晶种法、模板法、湿化学法、光还原法、电化学法和绿色合成法等, 其中多元醇合成法是制备 AgNWs 的主要方法^[2-4]。目前, 人们通过上述方法已成功制备出不同尺寸的 AgNWs。值得注意的是, 在诸多报道中, 助剂(无机盐或卤素, 如: CuCl_2 、 FeCl_3 、 KCl 、 NaCl 、 CoCl_2 、 NaBr 、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和 1-丁基-3-甲基咪唑

收稿日期: 2021-08-18

基金项目: 国家地区科学基金项目(21761016); 云南省重大研发专项(202002AB080001-1、202102AB080008、YPML-2022050201); 云南省中青年学术与技术带头人后备人才项目(2017FB142); 云南省万人计划-青年拔尖人才项目

第一作者: 毛华明, 男, 硕士, 助理工程师。研究方向: 稀贵金属纳米材料。E-mail: mhm@ipm.com.cn

*通信作者: 杨宏伟, 男, 博士, 研究员。研究方向: 稀贵金属纳米材料。E-mail: yhw@ipm.com.cn

氯([BMI]Cl)等)是决定 AgNWs 结构性能的一个重要因素。然而, 添加此类助剂虽然有利于合成 AgNWs, 但是其合成的 AgNWs 在一些应用领域存在着不足, 如光电、传感器和生物医学材料等。因为助剂中含有的卤素或金属离子, 在 AgNWs 生长过程中有一部分会吸附在银晶面或是晶格上, 在 AgNWs 洗涤处理中很难将其完全清除, 从而影响材料的导电、导热和生物相容性等性能^[5-9]。此外, 卤素的残留还会造成 AgNWs 存在环境不稳定性的问题, 因为卤素对湿度、温度、光照和电应力等环境因素较为敏感, 如果长期暴露在空气中, 极易产生腐蚀性, 从而降低材料的使用寿命^[10-13]。因此, 为了消除卤素或金属离子对 AgNWs 在使用过程中的影响, 无助剂直接合成 AgNWs 被认为是目前最为有效和可行的方法之一。

无助剂直接合成 AgNWs 的制备方法是一种有望实现一步合成出含杂质颗粒少、纯化工艺简单、最终产率高的银纳米线的重要制备方法。但目前该方法的合成控制技术还相对较差, 国内外对无助剂直接合成 AgNWs 的合成机理研究还不系统。因此, 对无助剂直接合成 AgNWs 的制备方法与控制机理的总结概述具有重要的现实意义。

1 多元醇法

多元醇法是在高温下, 通过多元醇将银离子(Ag^+)还原, 同时利用表面活性剂来防止纳米结构团聚的一种合成方法。多元醇法具有反应过程简易、成本低、工艺规模可扩大等优点, 因此被广泛应用于 AgNWs 的合成^[14-15]。

譬如 Lin 等^[16]以乙二醇(EG)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)和硝酸银(AgNO_3)为前驱体, 采用多元醇法制备 AgNWs, 成功制备出直径为 170 nm, 长度为 20 μm 的 AgNWs, 用该 AgNWs 制备的薄膜, 其透光率为 87.5%, 电阻为 110 Ω/sq , 可应用于透明和柔性电极、有机电子器件和光伏电池等。Nekahi 等^[17]通过以 EG 为还原剂, PVP(K30)为封端剂, 通过注入 AgNO_3 溶液的方法制备出长径比为 130 的 AgNWs。

在 AgNWs 形成过程中, 具有五重孪晶结构的晶种是最关键的因素。研究发现, 当反应体系中含有氧气时, 氧分子会吸附在 Ag 晶核上, 把孪晶晶种刻蚀成单晶晶种, 形成大量的银颗粒^[18-19]。因此, 有研究指出在合成 AgNWs 过程中, 通过惰性气体

保护可以降低 O_2 刻蚀, 从而有利于 AgNWs 的生成。如 Fahad 等^[20]以 AgNO_3 为前驱体, EG 为还原剂和溶剂, PVP 作为封端剂, 在惰性气体(Ar)保护的反应体系中, 产生了直径约 50 nm 的 AgNWs, 利用该 AgNWs 制成导电柔性薄膜, 其电阻达到 6.82 Ω/sq 。

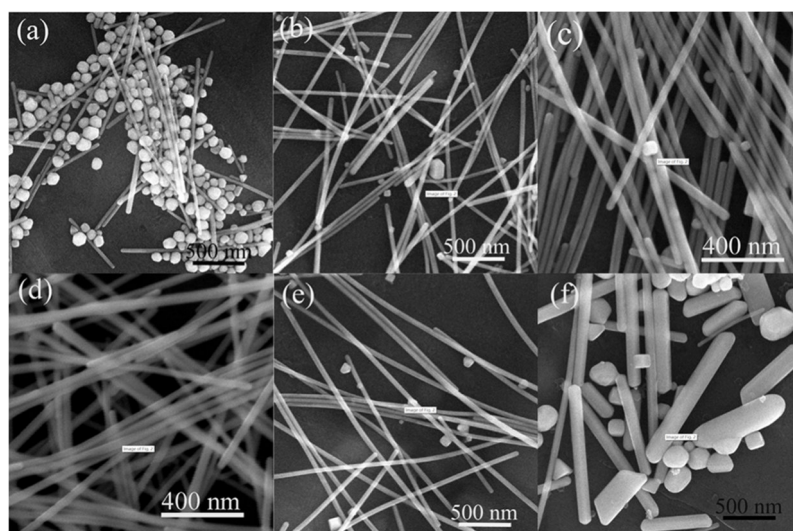
多元醇对 Ag^+ 的还原能力在很大程度上取决于其黏度、碳链长度和所含羟基的数量。除了 EG 外, 甘油也是一种常见的多元醇, 甘油具有 3 个羟基, 因此还原 Ag^+ 的能力优于 EG。此外, 由于甘油的沸点为 290 $^{\circ}\text{C}$, 作为反应溶液可以加热到 200 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 这样可以提高反应速度, 促进 Ag^+ 快速还原生长成 AgNWs^[21]。譬如, Liu 等^[22]以甘油为还原剂, PVP 为封端剂($M_w \approx 1300000$), 无需任何模板和盐即可大规模制备长径比可控的 AgNWs, 其 AgNWs 的直径和长度分别约为 40~50 nm 和 10~20 μm , 用该 AgNWs 制备柔性透明导电薄膜, 透光率为 89.9%, 电阻为 58 Ω/sq 。此外, 有报道指出通过调控甘油介质的粘度来可控制备 AgNWs。如 Jia 等^[23]以甘油和 EG 为溶剂, 在 PVP 存在下, 通过控制甘油和 EG 的配比来调控介质粘度, 从而可控合成了直径为 40 nm 的多晶 AgNWs, 如图 1 所示。

2 其他化学方法

2.1 晶种法

晶种法通常分为晶种成核与晶种生长两个阶段, 即先制备纳米晶作为晶种, 然后以晶种溶液为母液进行后续晶种生长。晶种生长分均相生长和非均相生长两种类型。其中, 晶种组成与沉积在晶种表面上的原子一致即为均相生长; 晶种组成与沉积的原子不一致则为非均相生长。因为晶种法可在不同阶段对反应进行调控, 因此, 不但可以控制生成材料的尺寸和长径比, 还可控制生成纳米材料的形貌^[24-25]。

在预先形成的晶种上优先沉积的种子介导生长是合成 AgNWs 较有效的方法^[26-27]。其中, Zhang 等人^[1]是最早使用金十面体粒子合成 AgNWs 的团队。此后, 其他研究人员也探索了使用 Ag 十面体和 Pd 十面体作为种子来合成 AgNWs^[26-28]。如 Sun 等^[28]通过引入 Pd 十面体粒子为晶种, 以 EG 为溶剂和还原剂, PVP 为封端剂, 制得直径为 30~40 nm, 长度可达到 50 μm 的 AgNWs, AgNWs 的电导率为 $0.8 \times 10^5 \text{ S/cm}$ 。在该合成方法中, Ag 纳米棒是由两



(a). 0:15; (b). 0.5:15; (c). 1:15; (d). 3:15; (e). 5:15; (f). 15:0

图 1 在乙二醇与甘油的不同体积比下制备的样品的扫描电镜图像^[23]

Fig.1 SEM images of samples prepared under different volume ratios of EG to glycerol

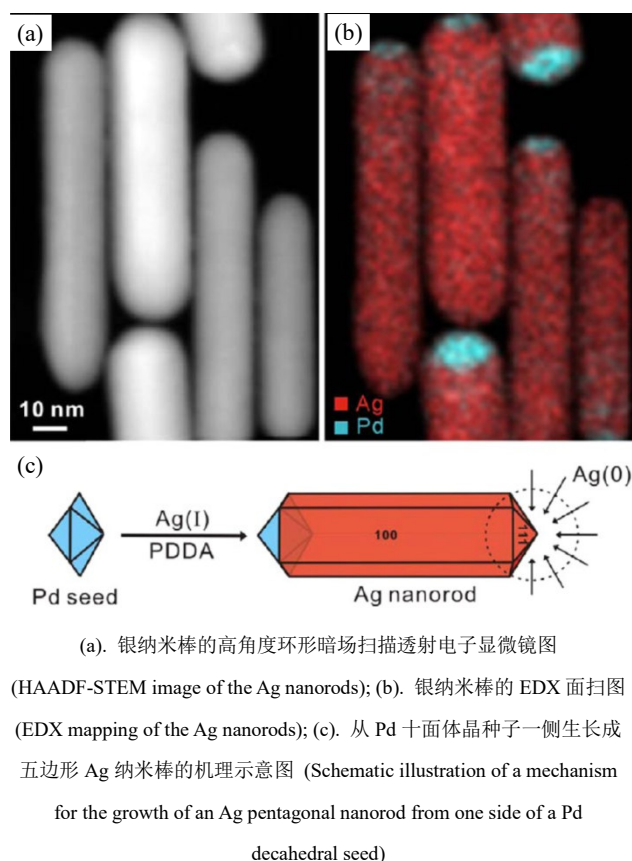
端的 10 个 {111} 面和 5 个 {100} 侧面结构的五孪晶结构组成。Ag 纳米棒从 Pd 十面体种子的 {110} 晶面方向生长, 同时在封盖剂(PVP)对 Ag {100} 表面的保护下, 促进 Ag {111} 晶面的生长, 最终形成 AgNWs 结构, 其生长机制如图 2 所示^[29]。

此外, Mao 等^[30]通过非均相晶种生长法, 使用 EG 将 AgNO₃ 还原成金属银, 并沉积在预先合成的银成核剂上, 通过调节反应温度可以快速合成高长宽比、均匀度高的 AgNWs。Hua 等^[31]报道了以微 AgNWs 作为晶种, 通过连续多步多元醇还原法制备得到直径达 1820 nm 的 AgNWs, 并且他们发现这种较粗的 AgNWs 在 SPP 传播模式测试中能量损失较小, 这对未来亚波长纳米光子电路和器件的设计和制作具有重要意义。

2.2 模板法

模板法是指选择合适的具有一定结构的模板材料, 利用空间限域和结构导向作用, 组装、引导和排列成具有特定形状、尺寸和结构的纳米材料。该方法主要分为硬模板法和软模板法^[32], 硬模板法主要分为阳极氧化铝(AAO)模板法和平行碳纳米管(CNT)模板法等; 软模板法主要分为生物分子模板法和离子液体模板法等^[33-35]。模板法具有易于合成定向纳米线阵列、模板成本低的优点, 但也存在后处理复杂、难以实现批量生产的缺点。

譬如, Dan 等^[36]利用 AAO 模板的纳米孔合成了直径约为 70~80 nm, 长度约为 2 μm 的 AgNWs, 并提出 PVP/AgNO₃ 的摩尔比、EG 浓度、反应温度和热解时间是影响 AgNWs 结构的主要因素。Yang



(a). 银纳米棒的高角度环形暗场扫描透射电子显微镜图 (HAADF-STEM image of the Ag nanorods); (b). 银纳米棒的 EDX 面扫图 (EDX mapping of the Ag nanorods); (c). 从 Pd 十面体晶种子一侧生长成五边形 Ag 纳米棒的机理示意图 (Schematic illustration of a mechanism for the growth of an Ag pentagonal nanorod from one side of a Pd decahedral seed)

图 2 AgNWs 的生长机制图^[29]

Fig.2 Illustration of the growth mechanism of silver nanowires

等^[37]同样采用 AAO 模板法制备了含有高度有序的 AgNWs 阵列的薄膜, 其 AgNWs 平均直径约为 35 nm。该模板法中利用 AAO 模板具有直径均匀的平行孔阵, 在反应过程中随着 AgNO₃ 的分解, 银核开

始在模板底部形成并沿通道定向生长, 最终形成符合 AAO 模板的孔径范围内的 AgNWs。Chen 等^[38]则以单宁酸为还原剂, 通过在 DNA 链上组装 Ag⁺ 制备了 AgNWs, 然后将合成的 AgNWs 加入到由聚氨酯和微米级镀银铜片组成的导电复合材料中, 制备出柔性导电复合材料, 其体积电阻率为 $2.13 \times 10^{-4} \Omega/\text{cm}$ 。

2.3 湿化学法

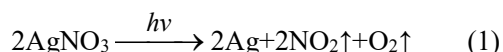
湿化学法是指反应体系为液相(多为水相), 采用有机物作为稳定剂或表面活性剂, 在还原剂作用下合成指定形貌的纳米材料。该方法反应温度相对较低, 而且具有对环境友好、工艺简单, 成本低等优点。

例如, Richard 等^[39]以水为介质, 使用苯胺、吡啶和 3-氨基吡啶作为表面活性剂, 柠檬酸三钠为还原剂, 制得直径约为 30 nm, 长度为 5~10 μm 的 AgNWs。其中表面活性剂的种类和反应温度是影响 AgNWs 最终形态的主要因素。Tian 等^[40]在水相体系中, 以 AgNO₃ 为银源, 单宁酸(C₇₆H₅₂O₄₆)作为还原剂, 合成直径约为 25 nm, 长度达 20 μm AgNWs。该方法不需要任何表面活性剂或包覆剂来引导纳米颗粒的各向异性生长, 仅通过控制反应温度和还原速率实现 AgNWs 的合成。特别地, 该 AgNWs 与通常报道的 AgNWs 或纳米棒的生长方向不同, AgNWs 通常以多孪晶结构产生, 但在该研究中, AgNWs 属于单晶结构, 其生长方向沿着{100}轴。晶种的各向异性生长受晶种的表面能影响, 银晶种各个晶面的表面能具有如下关系: $\gamma_{\{111\}} < \gamma_{\{100\}} < \gamma_{\{110\}}$, 银晶种的{110}面具有较高的表面能, 如果没有表面活性剂或封端剂的存在, 在较慢、较稳定的反应条件下, 及{110}和{100}晶面的驱动下, 新还原的银粒子优先沉积在{110}和{100}上, 从而得到沿着{100}轴生长的单晶 AgNWs。

3 非化学还原法

3.1 光还原法

光还原法是指以 Ag⁺ 为前驱体溶液, 表面活性剂作为保护剂, 在紫外光照射条件下通过光分解诱导 AgNO₃ 还原成银纳米粒子的还原方法。光还原法可以在室温下合成 AgNWs, 廉价的化学试剂和局部还原是光还原法的主要优点。Ag 纳米结构的形成机理如下所示:



很多研究人员通过光还原法合成出了 AgNWs 结构。其中, Zou 等^[41]通过利用光化学还原和种子介导的方法合成了直径为 35~120 nm, 长度为 50 mm 的 AgNWs。他们发现 PVP/AgNO₃ 的摩尔比、银粒子的体积、PVP 的存在以及紫外光的照射时间对制备 AgNWs 的形貌和长径比有重要的影响。Lin 等^[42]研究表明, 在黑暗条件下银粒子不会产生 AgNWs, 而是形成大量的孪晶银纳米粒子, 当选用波长小于 500 nm 的光源照射时, 银粒子会在 10 min 内形成一些孪晶边界和单晶银纳米粒子, 进而生成银纳米颗粒。这归因于在光诱导下, 表面等离子体共振可将银粒子成核加速转化成多重孪晶银纳米粒子。对于 AgNWs 的合成, Liu 等^[43]开发了一种紫外辐射下绿色合成方法, 利用磷钼酸作为催化剂和稳定剂, 在紫外光照射下还原 AgNO₃ 制备 AgNWs, 其中温度、辐照时间、AgNO₃ 与磷钼酸(POM)的摩尔比对 AgNWs 的形貌具有较大的影响。文中还指出, 因为 POM 与银纳米粒子的{100}晶面存在强烈的相互作用, 抑制了 Ag⁺ 在{100}晶面方向沉积, 相应地促进了 Ag⁺ 在{111}晶面方向沉积, 从而有利于 AgNWs 沿着{111}方向生长。该研究还验证了 AgNWs 具有良好的抗菌性能, 为 AgNWs 的抗菌应用提供了研究基础。

3.2 电化学还原法

电化学还原法是指通过电化学反应还原溶液中的金属离子来制备金属纳米材料的一种合成方法, 因为可以通过调节电流密度和电压大小来实现结构和粒径的精确控制, 因此常被用来制备高纯金属纳米材料, 而且在结合模板或有机膜的基础上, 电化学还原法的优势更加明显, 尤其是在制备一维金属纳米材料方面^[44]。

譬如, Tseng 等^[45]在无表面活性剂条件下, 采用电偶取代反应有效地合成了大量长径比为 1000 的超长(50 μm) AgNWs, 通过控制合成参数(包括 Ag⁺ 浓度、反应温度、Ag⁺ 源), 可获得不同形貌的银纳米结构。Liu 等^[46]报道了一种在扩散限制条件下合成 AgNWs 的方法, 在 AgNO₃ 溶液和甘油的混合物中通过电化学还原反应生成银粒子, 通过甘油来调控溶剂的粘度, 从而达到限制化学物质从本体到发生反应的电极表面的扩散。文中指出当甘油浓度较低时, 大量形成银枝晶, 随着甘油浓度增大, 树枝状结构消失, 形成 AgNWs 结构。在甘油浓度超过 75% 时, 大量合成了直径约为 100 nm、长度约为 5 μm 的 AgNWs。

4 绿色合成法

绿色合成法是指利用具有生长终止、稳定和封盖特性的天然产物来合成一维银纳米结构的绿色合成方法。用天然前体合成纳米材料具有成本效益高、反应简单、有害原料少以及可持续性等优点^[4, 47-48]。

Jeevika 等^[49]利用含有 81%~95% 酚类(丁香酚和乙酰丁香酚)的丁香油作为绿色还原剂和稳定剂,在室温下合成了直径为 30~80 nm, 长度为 2~5 μm 的 AgNWs。研究结果还表明 AgNO_3 的浓度是影响 AgNWs 的尺寸和形貌的主要因素。Marissa 等人^[47]使用两种不同的绿茶, 墨西哥皇家茶和韩国 Boseong 绿茶作为还原剂, PVP 作为封端剂合成直径大约 50 nm, 长度 1.3 μm 的 AgNWs, 该 AgNWs 对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌表现出较强的抗菌性能。Lin 等^[50]利用瘦管叶片的肉汤作为还原剂和封端剂, 合成了直径为 50~60 nm, 长度达数十微米的 AgNWs, 其中反应温度在 AgNWs 的形成中起着至关重要的作用。在合成初期, Ag^+ 被瘦管叶肉汤还原为银核, 周围的银原子不断聚集, 逐渐成长为相对较小的纳米粒子, 这些纳米粒子作为较大纳米粒子生长的种子, 然后生成两种不同尺寸的大型纳米颗粒。因为大颗粒的表面能比小颗粒的表面能低, 因此这些小的纳米颗粒容易溶解到溶液中, 而相邻的大颗粒在肉汤的作用下移动、相遇、粘连, 最终形成短链状结构。

5 结语

在诸多无助剂直接合成 AgNWs 的制备方法中, 晶种法可以准确控制 AgNWs 的尺寸、长径比, 但是操作繁琐, 而且引入的非均相晶种难以去除。模板法可以很容易地控制产物的形貌, 获得一致取向阵列的 AgNWs, 且具有较好的重复性和稳定性, 但后续纯化过程复杂, 不利于大规模的生产。湿化学法具有获得高纯度产品的潜力, 但产物转移和组装困难。光还原法成本廉价且合成的 AgNWs 尺寸均匀, 但是反应时间较长, 光还原反应程度难以控制, 不利于扩大生产。电化学法反应速率快, 但是合成的 AgNWs 不均匀, 产率低, 难以洗涤回收。绿色合成法成本效益高、反应简单、原料绿色环保, 但是所制备的 AgNWs 尺寸不均匀、产率低。

相比之下, 多元醇法效率高、操作简单、合成的 AgNWs 尺寸均匀可控, 可以实现大规模生产。

因此, 多元醇合成法是目前无助剂直接合成 AgNWs 的主要方法。但是, 多元醇合成法在无助剂添加条件下合成的 AgNWs 仍然存在不足, 如合成条件要求精准、长径比小及分散性差等缺点。因此, 未来仍需要对其制备工艺进行创新和优化, 才能制备出满足相关领域应用要求的 AgNWs 材料。

参考文献:

- [1] ZHANG P, WYMAN I, HU J, et al. Silver nanowires: Synthesis technologies, growth mechanism and multifunctional applications[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2017, 223: 1-23.
- [2] 孟宪伟, 刘世铎, 张泽磊, 等. 不同维度的银微纳米材料研究进展[J]. *贵金属*, 2020, 41(1): 77-84.
MENG X W, LIU S D, ZHANG Z L, et al. Research progress of silver micro-nano materials in different dimensions[J]. *Precious Metals*, 2020, 41(1): 77-84.
- [3] 孙延娜, 万相见, 李晨曦, 等. 银纳米线基柔性有机太阳能电池研究进展[J]. *中国材料进展*, 2022, 41(3): 188-196.
SUN Y, N WAN X J, LI C X, et al. Recent progress of flexible organic solar cells based on silver nanowire transparent electrode[J]. *Materials China*, 2022, 41(3): 188-196.
- [4] 肖妮, 唐定, 陈伊男, 等. 银纳米线的制备及电化学应用研究进展[J]. *黄金*, 2020, 41(12): 5-13.
XIAO N, TANG D, CHEN Y N, et al. Progress in the preparation and electrochemical application of silver nanowires[J]. *Gold*, 2020, 41(12): 5-13.
- [5] GUPTA R, RAO K D M, KIRUTHIKA, S, et al. Visibly transparent heaters[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(20): 12559-12575.
- [6] LEE J, LEE I, KIM T S, et al. Efficient welding of silver nanowire networks without post-processing[J]. *Small*, 2013, 9(17): 2887-2894.
- [7] HECHT D S, HU L, IRVIN G. Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(13): 1482-1513.
- [8] WU H, HU L, ROWELL M W, et al. Electrospun metal nanofiber webs as high-performance transparent electrode [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(10): 4242-4248.
- [9] ZENG X Y, ZHANG Q K, YU R M, et al. A new transparent conductor: Silver nanowire film buried at the surface of a transparent polymer[J]. *Advanced Materials*,

- 2010, 22(40): 4484-4488.
- [10] LEE J, AN K, WON P, et al. A dual-scale metal nanowire network transparent conductor for highly efficient and flexible organic light emitting diodes[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(5): 1978-1985.
- [11] EIECHINUERRA J L, LARIOS L L, LIU C, et al. Corrosion at the nanoscale: The case of silver nanowires and nanoparticles[J]. *Chemistry of Materials*, 2005, 17(24): 6042-6052.
- [12] LANGLEY D P, LAGRANGE M, GIUSTI G, et al. Metallic nanowire networks: Effects of thermal annealing on electrical resistance[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(22): 13535-13543.
- [13] LIU C H, YU X. Silver nanowire-based transparent, flexible, and conductive thin film[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2011, 6(1): 1-8.
- [14] 陈微微, 雷国伟, 李宇, 等. 超细银纳米线的制备技术研究[J]. *陕西煤炭*, 2020, 39(S1): 25-28.
- CHEN W W, LEI G W, LI Y, et al. Study on the preparation technology of ultrafine silver nanowires[J]. *Shaanxi Coal*, 2020, 39(S1): 25-28.
- [15] 赵玮, 赵春宝, 张君, 等. 核壳结构银纳米线的合成及神经形态网络特性[J]. *贵金属*, 2022, 43(1): 10-15.
- ZHAO W, ZHAO C B, ZHANG J, et al. Synthesis and neuromorphic network properties of core-shell silver nanowires[J]. *Precious Metals*, 2022, 43(1): 10-15.
- [16] LIN J Y, HSUEH Y L, HUANG J J. The concentration effect of capping agent for synthesis of silver nanowire by using the polyol method[J]. *Academic Press*, 2014, 214(6): 2-6.
- [17] NEKAHI A, MARASHI S P H, HAGSHENAS F D. High yield polyol synthesis of round- and sharp-end silver nanowires with high aspect ratio[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2016, 184(9): 130-137.
- [18] BINDHU M R, SATHE V G, UMADEVI M. SERS activities of green synthesized silver nanoparticles[J]. *Journal of Cluster Science*, 2015, 26(5): 1451-1461.
- [19] KAUFMANN D, SCHENIDER A S, MONIG R, et al. Effect of surface orientation on the plasticity of small bcc metals[J]. *International Journal of Plasticity*, 2013, 49: 145-151.
- [20] FAHAD S, YU H J, LI W, et al. Synthesis of silver nanowires with controlled diameter and their conductive thin films[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(14): 12876-12887.
- [21] SHOBINA L R, SASTIKUMARD D, MANIVANNANA S. Glycerol mediated synthesis of silver nanowires for room temperature ammonia vapor sensing[J]. *Sensors Actuators A*, 2014, 214: 74-80.
- [22] LIU B T, YAN H Q, CHEN S Y, et al. Stable and controllable synthesis of silver nanowires for transparent conducting film[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 122.
- [23] JIA C C, YANG P, ZHANG A Y, et al. Glycerol and ethylene glycol co-mediated synthesis of uniform multiple crystal- line silver nanowires[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, 143(2): 794-800.
- [24] ZHANG Q, LI W, MORAN C, et al. Seed-mediated synthesis of Ag nanocubes with controllable edge lengths in the range of 30-200 nm and comparison of their optical properties[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(32): 11372-11378.
- [25] ZHANG J, LANGILLE M R, MIRKIN C A. Synthesis of silver nanorods by low energy excitation of spherical plasmonic seeds[J]. *Nano Letters*, 2011, 11: 2495-2498.
- [26] YANG Y, WANG W, LI X, et al. Controlled growth of Ag/Au bimetallic nanorods through kinetics control[J]. *Chemistry of Materials*, 2013, 25: 34-41.
- [27] LI C, SUN L, SUN Y, et al. One-pot controllable synthesis of Au@Ag heterogeneous nanorods with highly tunable plasmonic absorption[J]. *Chemistry of Materials*, 2013, 25: 2580-2590.
- [28] SUN Y, GATES B, MAYEAS B, et al. Crystalline silver nanowires by soft solution processing[J]. *Nano Letters*, 2002, 2(2): 165-168.
- [29] LUO M, HUANG H, CHOI S I, et al. Facile synthesis of Ag nanorods with no plasmon resonance peak in the visible region by using Pd decahedra of 16 nm in size as seeds[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(10): 10523-10532.
- [30] MAO Y, WANG C, YANG H. Rapid and uniform synthesis of silver nanowires via rice-shaped silver nucleant[J]. *Materials Letters*, 2015, 142: 102-105.
- [31] HUA J J, WU F, FAN F G, et al. Synthesis and surface plasmonic properties of ultra-thick silver nanowires[J]. *Journal of Physics, Condensed Matter: An Institute of Physics Journal*, 2016, 28(25): 1-6.
- [32] XIE Y D, KOCAEFE D, CHEN C Y, et al. Review of research on template methods in preparation of nanomaterials[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2016, 6: 1-10.
- [33] ZHANG P, LI P, HUANG Y, et al. Show more enhanced

- removal of ionic dyes by hierarchical organic three-dimensional layered double hydroxide prepared via soft-template synthesis with mechanism study[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 360: 1137-1149.
- [34] PEREIRO I, CORS J F, PANE S, et al. Underpinning transport phenomena for the patterning of biomolecules[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48: 1236-1254.
- [35] CHEN J, MENG H M, TIAN Y, et al. Recent advances in functionalized MnO_2 nanosheets for biosensing and biomedicine applications[J]. *Nanoscale Horizons*, 2019, 4: 321-338.
- [36] DAN N V, NAM T H, TAM T T. The synthesis of silver nanowires in anodic aluminum oxide template[J]. *Inorganic Materials*, 2018, 3: 247-251.
- [37] YANG R, SUI C, GONG J, et al. Silver nanowires prepared by modified AAO template method[J]. *Materials Letters*, 2007, 61(3): 900-903.
- [38] CHEN S L, LIU K H, LUO Y F, et al. Construction of silver nanochains on DNA template for flexible electrical conductive composites[J]. *Material Letters*, 2015, 147: 109-112.
- [39] RICHARD B, FREDRIK S, BO L, et al. Synthesis of silver nanowires in aqueous solutions[J]. *Materials Letters*, 2010, 64(8): 956-958.
- [40] TIAN X L, LI J, PAN S. Facile synthesis of single-crystal silver nanowires through a tannin-reduction process[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2009, 11(7): 1839-1844.
- [41] ZOU K, ZHANG X H, DUAN X F, et al. Seed-mediated synthesis of silver nanostructures and polymer/silver nanocables by UV irradiation[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 273: 285-291.
- [42] LIN H Z, TATSUMI O, JAMES A, et al. Light-assisted nucleation of silver nanowires during polyol synthesis[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry*, 2011, 221(2): 220-223.
- [43] LIU L L, HE C D, LI J, et al. Green synthesis of silver nanowires via ultraviolet irradiation catalyzed by phosphor-molybdic acid and their antibacterial properties[J]. *New Journal of Chemistry*, 2013, 37(7): 2179-2185.
- [44] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ L, BLANCO M C, LÓPEZ-QUINTELA M A. Electrochemical synthesis of silver nanoparticles[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2000, 104(41): 9683-9688.
- [45] TSENG S T, LYU L M, HSIAO K Y, et al. Surfactant-free synthesis of ultra-long silver nanowires for durable transparent conducting electrodes[J]. *Chemical Communications*, 2020, 56(42): 5593-5596.
- [46] LIU W, WANG K, ZHOU Y, et al. Rational synthesis of silver nanowires at electrode interface by diffusion limitation[J]. *CrystEngComm*, 2019, 21: 1-18.
- [47] MARISSA F G, MARTIN T R, EDGARDO S V, et al. Practical mediated-assembly synthesis of silver nanowires using commercial *Camellia sinensis* extracts and their antibacterial properties[J]. *New Journal of Chemistry*, 2018, 42(3): 2133-2139.
- [48] 孙和远, 王小菊, 陈茜, 等. 用苦瓜提取液还原制备纳米银的研究[J]. *贵金属*, 2020, 41(4): 15-20.
- SUN H Y, WANG X J, CHEN X, et al. Study on preparation of nano-silver by reduction of *Momordica charantia* extracts[J]. *Precious Metals*, 2020, 41(4): 15-20.
- [49] JEEVIKA A, SHANKARAN D R. Seed-free synthesis of 1D silver nanowires ink using clove oil (*Syzygium aromaticum*) at room temperature[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 458: 155-159.
- [50] LIN L, WANG W, HUANG J. Nature factory of silver nanowires: Plant-mediated synthesis using broth of *Cassia fistula* leaf[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 162: 852-858.