

银纳米线基柔性导电材料的研究进展

段莎莎, 张 玲, 李春忠

(华东理工大学 超细材料制备与应用教育部重点实验室, 上海 200237)

摘 要: 柔性导电材料是下一代柔性电子设备中不可缺少的组成部分, 高性能柔性导电材料的研究和开发对于柔性电子设备的发展具有重要的意义, 如: 智能手机、电子皮肤、可折叠的电子书、应变传感器以及可拉伸太阳能电池。由锡氧化物 (ITO) 制备的传统的刚性导电材料已经不能满足新型的柔性设备的需求, 几种材料被用来取代 ITO, 包括: 石墨烯、碳纳米管、导电高分子以及金属纳米材料。在这几种取代 ITO 的材料中, 银纳米线 (AgNWs) 作为一种新型的纳米材料, 不仅具备高的电导率, 纳米材料的尺寸效应, 同时又赋予了其优异的光学性能和柔韧性, 使其在柔性导电材料的制备中具有非常广阔的应用前景。主要介绍了 AgNWs 在柔性透明电极和可拉伸电极中的应用。首先介绍了 AgNWs 柔性透明电极的制备方法和 AgNWs 膜的后处理方法, 阐述了每种方法的优势和劣势; 将 AgNWs 与可拉伸基体结合可获得 AgNWs 基可拉伸电极, 介绍了几种不同形式的 AgNWs 基可拉伸电极包括: 二维的、三维的以及纤维状的电极, 以及不同形式电极对应的制备方法; 除此以外, 还介绍了通过将 AgNWs 与第二导电组分的复合获得性能优异的柔性导电材料, 最后对 AgNWs 基柔性电极未来的发展进行了展望。

关键词: 银纳米线; 柔性透明电极; 可拉伸电极

中图分类号: TQ131.22 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2016)07-0545-07

Research Progress of Silver Nanowires Based Flexible and Conductive Materials

DUAN Shasha, ZHANG Ling, LI Chunzhong

(Key Laboratory for Ultrafine Materials of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Flexible and conductive materials (FCMs) are the key building blocks of next-generation electronics such as smart phone, E-skins, folding E-books, strain sensors as well as stretchable solar cell. Thus, fabricating high-quality FCMs is of great importance to the development of future flexible electronics. Traditional conductive materials are mainly prepared by indium tin oxide (ITO) which is rigid and could not satisfy the needs of novel flexible electronics. Several materials have been applied to replace ITO in the fabrication of flexible electrodes including graphene, carbon nanotubes, conducting polymer and metal nano-materials. Among all the alternatives of ITO, silver nanowires (AgNWs), as a novel nano-material, inherited the high electrical conductivity from metal Ag. Besides, the nanometer-sized effect imparts AgNWs both excellent optical property and flexibility, which endows it great potential in the application of FCMs. This review separately illustrates flexible transparent electrodes (FTEs) and stretchable electrodes based on AgNWs. For

AgNWs-based FTEs, several coating methods and the post-treatment of AgNWs-based FTEs such as high-temperature annealing and mechanical pressing were introduced and the advantage and disadvantage of each method were stated. In addition, AgNWs-based

收稿日期: 2015-11-30

第一作者: 段莎莎, 女, 1991 年生, 博士

通讯作者: 李春忠, 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师

Email: czli@ecust.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.07.09

stretchable electrodes could be prepared by integrating AgNWs with stretchable matrices. Here, AgNWs-based electrodes with different shapes were introduced in detail including two-dimensional, three-dimensional as well as fibrous electrodes and their fabrication methods were also presented. Meanwhile, AgNWs are composed of a second electrically conductive material to obtain flexible electrodes with more excellent performance. Finally, the future developments of AgNWs-based FCMs were proposed.

Key words: silver nanowires; flexible transparent electrode; stretchable electrode

1 前 言

随着电子技术的发展,越来越多的电子器件朝着柔性化的方向发展,如智能服装、机器人皮肤、可卷曲的电子书、应变传感器、可拉伸的太阳能电池等^[1-4],而传统的无机半导体或金属氧化物基的导电材料由于其刚性和质脆的特性,已无法满足新一代电子设备的需求,因此,新型的柔性导电材料亟需开发。为了满足这些需求,研究者们围绕其核心问题—高导电率和柔韧性,开展了大量的研究工作。其中,制备柔性导电材料的关键在于将导电组分与柔性的聚合物基体有效的结合,使最终得到的材料在一定的应力($>>1\%$)多次循环作用之下,电学性能不会出现疲劳或显著下降。近年来,石墨烯^[5-6]、碳纳米管^[7-8]、金属纳米材料^[9-10]以及导电高分子材料^[11-12]相继被用作导电组分来制备柔性导电材料,并应用于多种柔性的电子设备中。其中,银纳米线(AgNWs)同时结合了银优良的导电性以及纳米线的尺寸效应,具备优异的透光性,被广泛地应用于柔性透明电极;与此同时,由AgNWs形成的渗流网络拥有优良的柔韧性,可适应较大形变,因此也被用于制备可拉伸的电子设备^[13]。

本文以柔性的电子设备为应用背景,从AgNWs基的柔性透明导电材料和可拉伸导电材料入手,着重讨论制备AgNWs基柔性电极的新颖的策略与方法,说明AgNWs在下一代智能电子设备中的重要作用与地位。

2 AgNWs 基柔性透明电极

2.1 ITO 的取代物

透明电极是显示器、触摸屏、平板电脑、有机发光二极管、有机太阳能电池等电子设备的重要组成部分,传统的透明电极是将铟锡氧化物(ITO)通过喷溅涂覆沉积在透明的玻璃基质上制备得到,其在电阻为 $10\ \Omega/\text{sq}$ 时可达到90%的透光度。但铟资源的稀缺和脆性,以及喷溅过程高昂的成本等缺点都限制了ITO在新一代柔性的透明电极中的应用^[12]。石墨烯、

碳纳米管、金属纳米线以及导电高分子都被用来取代ITO制备柔性透明电极。其中,氧化还原法制备得到的石墨烯、碳纳米管以及导电高分子聚乙烯二氧噻吩(PEDOT:PSS)都可实现溶液相的大规模化涂覆,具有较低的生产成本,但其光电性能仍无法与ITO相比。通过化学气相沉积法在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 下生长的石墨烯,转移至透明基质上可得到性能较优的透明导电膜,但复杂的制备过程限制了其大规模的使用^[5]。溶液中制备得到的AgNWs既可以实现大规模的卷对卷涂覆,又具备可比拟ITO的光电性能,成为取代ITO最有潜力的材料。美国Cambrios Technologies公司通过优化AgNWs的合成、提纯以及涂覆方法,获得的透明导电膜在透光度为95%时,电阻仅为 $20\ \Omega/\text{sq}$,说明AgNWs基的柔性透明导电膜相比其他几种取代材料具有巨大的优势^[2]。

2.2 AgNWs 膜的制备

AgNWs膜的制备方法多种多样,包括:真空抽滤法^[13,40-41]、滴涂法^[28]、旋涂法^[31]、喷涂法^[16,43]、迈耶棒涂覆法^[10,17,42]以及卷对卷涂覆法。在这几种方法中,真空抽滤法通常需要先先将AgNWs的溶液抽滤成膜,再转移至目标基质,此法可得到均匀的膜,但需两步,无法大规模生产。滴涂法是将AgNWs的悬浮液滴在基质上,但咖啡环的形成会破坏其均匀性。旋涂、喷涂和迈耶棒涂覆法都可获得均匀的膜,但旋涂需要大量额外的溶液,而且无法大规模生产,喷涂和迈耶棒都可在较大规模上制备AgNWs膜,但由于迈耶棒的沉积速度更快,因此相比较于喷涂法有更大的优势。除此以外,美国Cambrios Technologies公司还报道了卷对卷涂覆法大规模制备AgNWs膜的方法,即先涂覆一层AgNWs膜,干燥后,再涂覆一层聚合物保护层,紫外光固化后,便可得到透明的柔性电极,整个过程都是在较低温度下进行,使得柔性基板不会受到高温的损害。

2.3 AgNWs 膜光电性能的尺寸依赖性

银纳米线的尺寸对其光学和电学性质有一定的影

响, 一般来说, 银纳米线的长度越长、直径越小, 其透光度越高电阻越小。目前市场上广泛应用的金属纳米线的长度较短, 为 20~40 μm , 限制了银纳米线在柔性导电材料中的应用。Lee 等人^[14]用“连续多次生长法”制备了超长银纳米线 (>500 μm), 将其抽滤成膜, 转移至 PET 基板上, 用激光焊接的方法减小其电阻, 最后得到的银纳米线导电膜, 透光度为 85% T 时, 电阻为 47 Ω/sq 。

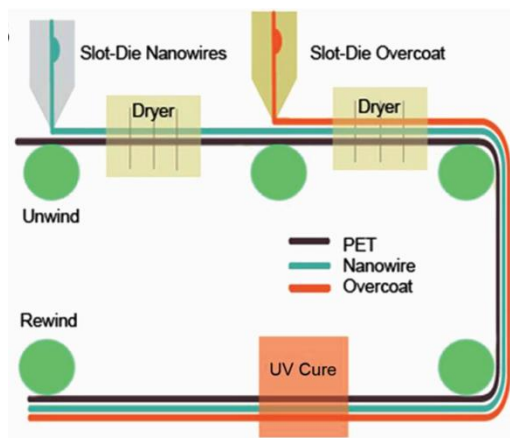


图 1 卷对卷涂覆过程

Fig. 1 Process of roll-to-roll coating

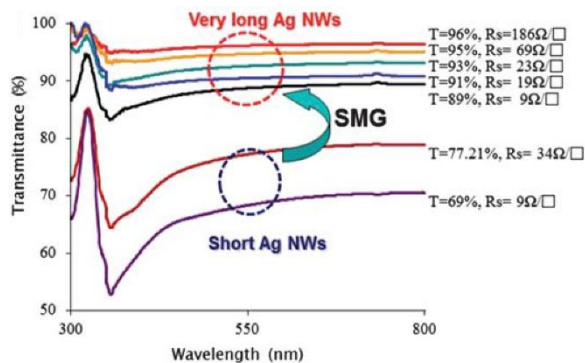


图 2 银纳米线的长度对其透光度及电阻值的影响

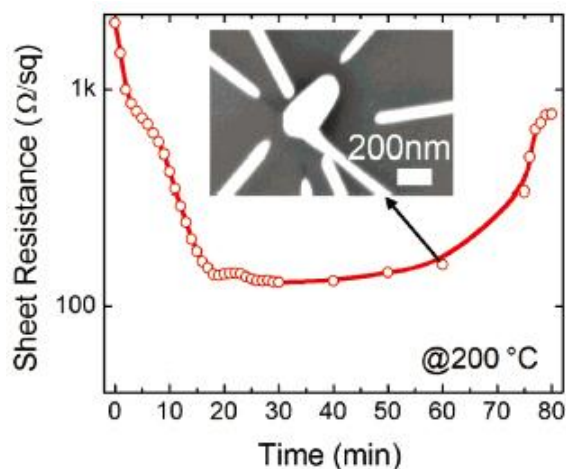
Fig. 2 Effects of the length of silver nanowires on transmittance and sheet resistance

2.4 AgNWs 膜的处理

通常, 未经处理的纯 AgNWs 膜存在以下几个问题: 电阻大、表面粗糙度大、与基质的粘附性能差, 而通常解决这些问题的方法包括: 高温退火^[15]、机械压榨法^[16-18]、激光焊接^[19-22]。

AgNWs 的电阻大部分是来自于线与线之间的接触电阻, 要降低接触电阻就要增加线与线之间的接触面积, 从而增加电子传输。较普遍的降低接触电阻的

方法是高温退火, Lee 等人^[15]将 AgNWs 在 220 $^{\circ}\text{C}$ 下退火 20 min, 使其电阻从 >1 $\text{k}\Omega/\text{sq}$ 降至 100 Ω/sq , 这是因为在高温退火的过程中, AgNWs 表面的聚乙烯吡咯烷酮流动且部分分解, 使得 AgNWs 相互扩散, 线与线之间的接触面积增加。进一步增加退火时间会使 AgNWs 合并成不连续的液滴, 反而使电阻增大。

图 3 200 $^{\circ}\text{C}$ 下退火时间对银纳米线电阻的影响Fig. 3 Sheet resistance vs annealing time for an AgNWs film at 200 $^{\circ}\text{C}$

机械压榨法是另一种减小接触电阻, 降低表面粗糙度的方法。Hauger T C 等人^[16]喷涂了一层银纳米线膜, 在银纳米线膜底部 165 $^{\circ}\text{C}$ 加热的同时, 用钢棒碾压 6 次, 使银纳米线间的接触更加紧密, 接触电阻降低, 由此法制备的银纳米线导电膜, 透光度 >80% 时, 电阻约为 17 Ω/sq 。除此以外, 激光焊接也可降低 AgNWs 膜的电阻, 如将 AgNWs 膜暴露于卤钨灯光源中 1 min, 光源功率密度为 30 W/cm^2 时, 电阻可降低 3 倍^[19]。这样快速的处理方法使其可适用于卷对卷的大规模制备中。

AgNWs 与基质的粘附性也是一项重要的指标, 近几年来受到越来越多的关注。纯的 AgNWs 膜很容易从基质的表面撕离, 这大大限制了其在实际生产中的应用。将 AgNWs 嵌在聚合物中可以增加 AgNWs 膜的粘附性, 但是这种方法通常需要额外的转移步骤^[23-25]。Aker 等人^[26]在 PDMS 表面沉积一层聚多巴胺, 再涂覆 AgNWs, 聚多巴胺上的功能基团分别与有机的聚合物基质、无机的 AgNWs 涂层通过键合作用紧密地结合, 从而增加了 AgNWs 与基质之间的粘附, 但粘附层的加入降低了 AgNWs 膜的透光度。Jin 等人^[27]利用藻酸凝胶, 获得了粘附性和电导率都提升的高性

能 AgNWs 柔性电极。其中, CaCl_2 的加入一方面利用 Ca^{2+} 交联藻酸凝胶, 使底部的 AgNWs 被埋在凝胶中, 增加 AgNWs 与基质的粘附性; 另一方面 Cl^- 可以除去 AgNWs 表面的封端剂, 增加线与线之间的接触从而降低接触电阻。最终得到的 AgNWs 膜在透光度为 92.5%

时, 电阻仅为 $30.6\Omega/\text{sq}$, 同时 AgNWs 与基质之间的粘附性也大大增加。通常, 衡量导电层与基质之间的粘附性的方法是胶带粘离测试, 通过膜粘离的难易程度判定膜粘附性的好坏。

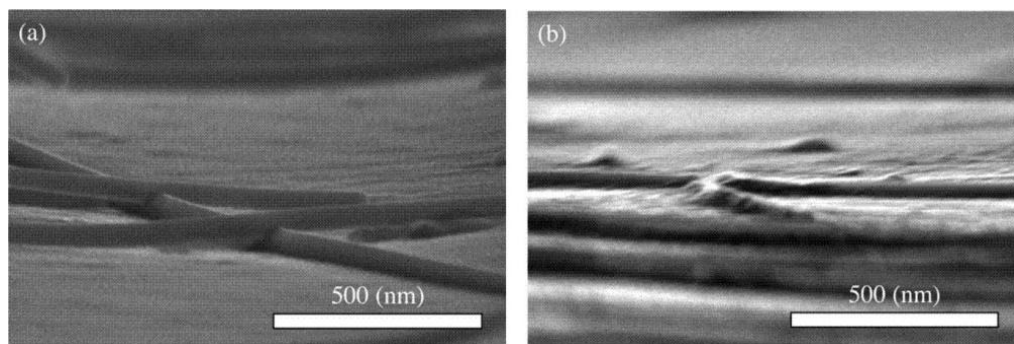


图 4 纯 AgNWs 膜 (a) 和在 165 °C 下卷压过的 AgNWs (b) 的 SEM 照片

Fig. 4 SEM images of pristine AgNWs film (a) and AgNWs film after rolled at 165 °C (b)

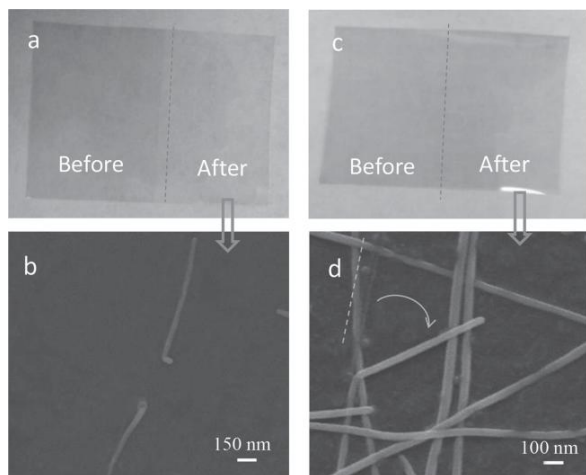


图 5 (a) 和 (c) 分别为 AgNWs 膜和藻酸凝胶增强的 AgNWs 膜胶带粘离前后的照片; (b) 和 (d) 分别为 AgNWs 和藻酸凝胶增强的 AgNWs 膜胶带粘离后的 SEM 照片

Fig. 5 Photographs of pristine AgNWs film (a) and AgNWs film reinforced by alginate gel (c) before and after a tape test, and SEM images of pristine AgNWs film (b) and AgNWs film reinforced by alginate gel (d) after a tape test

3 AgNWs 基可拉伸电极

AgNWs 纳米级的尺寸不仅赋予其优异的光学性能, 也同时赋予其柔韧性, 由随机分布的 AgNWs 形成的渗流网络用于可拉伸电极时, 表现出优越的

电导率和可形变性。若将极薄的 AgNWs 膜与透明的弹性体基质结合, 便可制备得到可拉伸的透明电极; 当 AgNWs 含量增加, 或将 AgNWs 与一些特定结构的弹性基体 (如: 三维多孔结构的弹性体) 或者不透明的纤维结合, 得到的可拉伸电极便不再透明。

3.1 二维 AgNWs 基可拉伸电极

二维 AgNWs 基可拉伸电极是将 AgNWs 膜沉积在平面的弹性基质上。制备这种材料最常用的方法是预先滴涂 AgNWs 溶液, 覆盖一层弹性体的预聚体, 固化后 AgNWs 部分嵌入弹性体中, 撕离后便可得到可拉伸的 AgNWs 电极^[28]。当弹性体具有某种功能时, 可获得功能性的弹性导体, 比如, 用可愈合的高分子与 AgNWs 结合时, 便能够制备可以愈合的可拉伸电极^[29]。最常用的弹性体是聚二甲硅氧烷 (PDMS), 而 AgNWs 与 PDMS 之间形成的是物理键, 因此当减小 AgNWs 膜的厚度至透明时, 这种方法可能会对膜的电性能造成较大的破坏。Wang 等人^[30]将两亲性的 Zonyl 与 PDMS 的预聚体混合, 利用 Zonyl 同时与 PDMS 和 AgNWs 之间强的化学键, 实现了透明 AgNWs 膜的高效转移。

除此以外, 也可直接将 AgNWs 通过膜转移^[13,40]、旋涂^[31]、喷涂^[26,43]等方法沉积在弹性体。相较前一种方法, 这类方法可以同时结合基质预拉伸的优势。Lee 等人^[13]将超长 AgNWs 抽滤成膜, 再转移至预拉伸的弹性基质 Eflox 上, 得到的电极拉伸至 460%

应变时, 电导率基本不变。若将 AgNWs 通过喷涂或旋涂的方式直接沉积在透明的弹性基质 PDMS 上时, 由于 PDMS 的强疏水性, AgNWs 较难在 PDMS 上分散均匀, 而且 AgNWs 层与 PDMS 很容易分离。氧等离子体处理虽然可以赋予 PDMS 亲水性, 但这种亲水性会在几分钟后消失, 因此永久性地赋予 PDMS 亲水性, 并增加 AgNWs 层与 PDMS 之间的粘附性有非常重要的意义。Lee 等人^[31]在 PDMS 表面接枝硅烷基团, 得到了性能更优的可拉伸透明电极, 透光度为 87% 时, 电阻仅为 25 Ω/sq , 导电层与基质之间强的粘附性使材料可承受多次的弯曲和拉伸。

3.2 三维多孔结构的 AgNWs 基可拉伸电极

将三维多孔结构与可拉伸电极结合有非常大的优势, 这种特殊的结构自身可以承受部分应变, 使导电网络的实际形变小于施加的应变, 从而减缓材料在拉伸过程中电性能的降低。Yu 等人分别制备了三维多孔的 AgNWs 气凝胶^[32], 利用 PU 作为三维多孔的骨架结合 AgNWs^[33], 回填 PDMS 后得到可拉伸的 AgNWs 电极, 电导率在 10.5~12.5 S/cm, 拉伸 100% 时, 电阻变为原来的 1.5~1.6 倍。

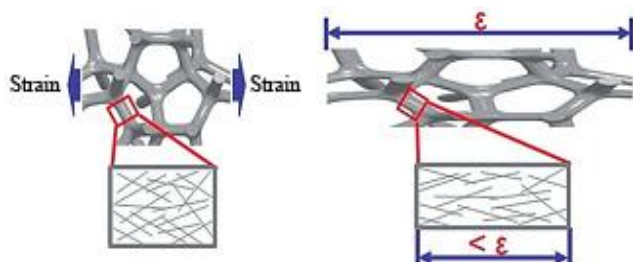


图 6 拉伸形变下聚氨酯泡沫-AgNWs-PDMS 网络结构的延伸效应

Fig 6 Illustration of effects of elongation the PUS-AgNW-PDMS micro-network and the AgNW nano-network (expansions) of the composite under tensile strain.

3.3 AgNWs 基可拉伸导电纤维

制备 AgNWs 基可拉伸纤维两种主要的方式: 一种是在弹性纤维表面通过反复浸渍的方式负载 AgNWs, 另一种是将 AgNWs 溶于弹性体中制备导电纤维。第一种方法中, 可以通过浸渍次数调控负载的 AgNWs 含量, 通常这类材料的电导率较高, 同时, 由于弹性纤维的高度可拉伸性, 获得的导电纤维也具有较高的可拉伸性。Cheng 等人^[34]利用“缠绕弹簧”状的纤维作支撑, 包覆 AgNWs、PDMS 后, 获得的材料同时具备高的电导率和可拉伸性, 应变为 0 时, 其电导

率为 4018 S/cm, 在拉伸 500% 后, 电导仍高达 688 S/cm。若要将 AgNWs 与弹性体互溶, 就需要对溶剂进行调控, 相比前一种方法, 这种方法得到的材料的电性能较差, 需要再次负载其他导电组分改善电性能。Choi 等人^[35]通过配体交换, 将 AgNWs 均匀分散于热塑性弹性体中, 制备得到了可穿戴的热疗设备。Lee 等人^[36]利用特定溶剂将 AgNWs 溶于嵌段共聚物中, 纺丝并包覆一层 Ag 颗粒以提升导电性。

4 AgNWs 与其他导电组分的结合

每种材料都有自己的优势和不足, 若将 AgNWs 与其他导电材料相结合, 不仅可以互相弥补对方的不足, 还能获得性能更优的产品。AgNWs 分别与石墨烯^[37-39]、碳纳米管^[40]得到既有优异的光电性能, 又兼具可拉伸性的透明电极。将聚乙烯二氧噻吩 (PEDOT:PSS) 与 AgNWs 复合制备柔性透明导电膜^[41-43], PEDOT:PSS 的加入不仅降低 AgNWs 的粗糙度, 还起到焊接 AgNWs 接触点的作用, 大大降低了 AgNWs 的接触电阻的同时还增加了导电膜与基质的粘附性。

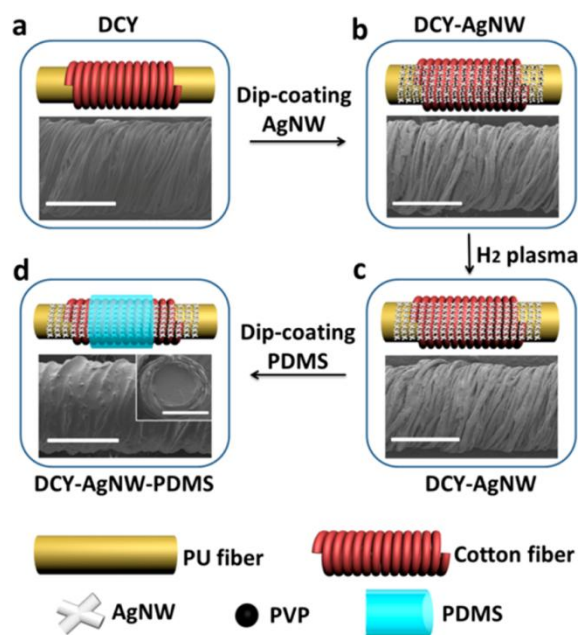


图 7 “缠绕弹簧”状 AgNWs 导电纤维的制备过程示意图

Fig. 7 Schematic of the fabrication process of AgNWs-based conductive fiber like twinning spring

5 结 语

以 AgNWs 为基础的柔性导电材料近些年得到

了快速地发展,也取得了很大的成就与进步,尤其是在柔性透明导电材料方面。AgNWs 优异的电学和光学性能使其成为取代 ITO 最具潜力的一类材料。各类研究也逐渐解决了 AgNWs 存在的问题,但较大规模制备的同时兼具优异的光电性能和良好的粘附性的 AgNWs 膜仍有待进一步发展,这也关系到最终 AgNWs 是否能在实际应用中发挥效用。AgNWs 自身高的电导率以及其渗流网络的柔韧性使其同样适用于可拉伸电极,而对 AgNWs 基的可拉伸电极的研究较少。目前 AgNWs 基可拉伸电极需要向多种微观结构的方向发展,可以通过调控基体的微观结构来调节材料的宏观性能,使其在大形变下仍能保持较好的电导率,最终能应用于可穿戴的设备中。

参考文献 Reference

- [1] Du J H, Pei S F, Ma L P, *et al. Advanced Materials* [J], 2014, 26(13): 1 958-1 991.
- [2] Ye S R, Rathmell A R, Chen Z F, *et al. Advanced Materials* [J], 2014, 26(39): 6 670-6 687.
- [3] Cheng T, Zhang Y Z, Lai W Y, *et al. Advanced Materials* [J], 2015, 27(22): 3 349 3 376.
- [4] Benight S J, Wang C, Tok J B H, *et al. Progress in Polymer Science* [J], 2013, 38(12): 1 961-1 977.
- [5] Acro L G D, Zhang Y, Schlenker C W, *et al. ACS Nano* [J], 2010, 4(5): 2 865-2 873.
- [6] Xu Z, Liu Z, Sun H Y, *et al. Advanced Materials* [J], 2013, 25(23): 3 249-3 253.
- [7] Ryu S, Lee P, Chou J B, *et al. ASC Nano* [J], 2015, 9(6): 5 929-5 936.
- [8] Zhang Y Y, Sheehan C J, Zhai J Y, *et al. Advanced Materials* [J], 2010, 22(28): 3 027-3 031.
- [9] Amjadi M, Pichitpajongkit A, Lee S, *et al. ASC Nano* [J], 2014, 8(5): 5 959-5 936.
- [10] Kim T Y, Kim Y W, Lee H S, *et al. Advanced Functional Materials* [J], 2013, 23(10):1 250-1 255.
- [11] Vosgueritchian M, Lipomi D J, Bao Z N. *Advanced Functional Materials* [J], 2012, 22(2): 421-428.
- [12] Mengistie D A, Ibrahim M A, Wang P C, *et al. ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2014, 6(4):2 292-2 299.
- [13] Lee P, Lee J, Lee H, *et al. Advanced Materials* [J], 2012, 24(25):3 326-3 332.
- [14] Lee J, Lee P, Lee H, *et al. Nanoscale* [J], 2012, 4(20): 6 408-6 414.
- [15] Lee J Y, Connor S T, Cui Y, *et al. Nano Letters* [J], 2008, 8(2):689-692.
- [16] Hauger T C, Al-Rafia S M, Buriak J M. *ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2013, 5(23):12 663-12 671.
- [17] Hu L B, Kim H S, Lee J Y, *et al. ACS Nano* [J], 2010, 4(5): 2 955-2 963.
- [18] Tokuno T, Nogi M, Karakawa M, *et al. Nano Research* [J], 2011, 4(12):1 215-1 222.
- [19] Garnett E C, Cai W S, Cha J J, *et al. Nature Materials* [J], 2012, 11(3): 241-249.
- [20] Jiu J, Nogi M, Sugahara T, *et al. Journal of Materials Chemistry* [J], 2012, 22(44):23 561-23 567.
- [21] Guo S. *Nanoscale* [J], 2010, 2(12): 2 521-2 529.
- [22] Kang J S, Ryu J, Kim H S, *et al. Journal of Electronic Materials* [J], 2011, 40(11):2 268-2 277.
- [23] Yu Z B, Zhang Q W, Li L, *et al. Advanced Materials* [J], 2011, 23(5): 664-668.
- [24] Gaynor W, Burkhard G F, Mcgehee M D, *et al. Advanced Materials* [J], 2011, 23(26):2 905-2 910.
- [25] Miller M S, O'Kane J C, Niec A, *et al. ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2013, 5(20): 10 165-10 172.
- [26] Akter T, Kim W S. *ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2012, 4(4):1 855-1 859.
- [27] Jin Y, Li L, Cheng Y, *et al. Advanced Functional Materials* [J], 2015, 25(10):1 581-1 587.
- [28] Xu F, Zhu Y. *Advanced Materials* [J], 2012, 24(37): 5 117-5 122.
- [29] Chaokun G, Jiajie L, Wei H, *et al. Advanced Materials* [J], 2013, 25(30):4 186-4 191.
- [30] Jiangxin W, Chaoyi Y, Wenbin K, *et al. Nanoscale* [J], 2014, 6(18):10 734-10 739.
- [31] Lee H, Lee K, Park J T, *et al. Advanced Functional Materials* [J], 2014, 24(21): 3 276-3 283.
- [32] Gao H L, Xu L, Long F, *et al. Angewandte Chemie* [J], 2014, 53(18): 4 561-4 566.
- [33] Ge J, Yao H, Wang X, *et al. Angewandte Chemie* [J], 2013, 52(6):1 654-1 659.
- [34] Cheng Y, Wang R R, Sun J, *et al. ACS Nano* [J], 2015, 9(4): 3 887-3 895.

- [35] Choi S, Park J, Hyun W, *et al.* *ACS Nano* [J], 2015, 9(6): 6 626-6 633.
- [36] Lee S, Shin S, Lee S, *et al.* *Advanced Functional Materials* [J], 2015, 25(21):3 114-3 121.
- [37] Lee M S, Lee K, Kim S Y, *et al.* *Nano Letters* [J], 2013, 13(6):2 814-2 821.
- [38] Liang J, Li L, Tong K, *et al.* *ACS Nano* [J], 2014, 8(2):1 590-1 600.
- [39] Chen R Y, Das S R, Jeong C, *et al.* *Advanced Functional Materials* [J], 2013, 23(41): 5 150-5 158.
- [40] Lee P, Ham J, Lee J, *et al.* *Advanced Functional Materials* [J], 2014, 24(36):5 671-5 678.
- [41] Gaynor W, Burkhard G F, McGehee M D, *et al.* *Advanced Materials* [J], 2011, 23(26): 2 905-2 910.
- [42] Lee J, Lee P, Lee H B, *et al.* *Advanced Functional Materials* [J], 2013, 23(34):4 171-4 176.
- [43] Choi D Y, Kang H W, Sung H J, *et al.* *Nanoscale* [J], 2013, 5(3): 977 983.
- [44] Lee J H, Shin H S, Noh Y J, *et al.* *Solar Energy Materials & Solar Cells* [J], 2013, 114:15-23.

(编辑 盖少飞)

沉痛悼念《中国材料进展》编委会原副主任胡壮麒院士

中国工程院院士、我国著名的材料学家，中国科学院金属研究所研究员，《中国材料进展》编委会原副主任/顾问委员胡壮麒院士，因病医治无效，于 2016 年 7 月 10 日 17 时在沈阳逝世，享年 87 岁。惊悉噩耗，万分悲痛！

胡壮麒院士长期从事高温合金、定向结晶、单晶合金、金属间化合物和亚稳材料的研制及其它新材料和新工艺的研究，发展了一系列性能优异的新材料，为我国科技和国防事业做出了重要贡献。他致力于研究平衡凝固和在约束条件下的定向凝固及快速凝固理论，在溶质的非平衡再分配和相析出规律，快速凝固的热流及溶质捕获等领域做出了开拓性的工作。他先后发表学术论文 500 余篇，代表性著作有《凝固技术》、《亚稳金属材料》、《金属材料半固态加工理论与技术》等著译作 13 本，获得各种国家部省级奖励 10 余项，其中“发动机配套的多孔气冷铸造一级涡轮叶片的研制与推广”获国家科技进步一等奖。他历任中国科学院金属研究所学术委员会主任、高温合金与特种铸造研究室主任、快速凝固与非平衡合金国家重点实验室主任等职。他于 1995 年当选中国工程院院士，2003 年获何梁何利基金科学与技术进步奖，2004 年被中国金属学会高温合金学术委员会授予杰出贡献奖。

2009 年，他以 80 岁高龄积极参与《中国材料进展》创刊，先后担任我刊编委会副主任及顾问委员，长期为杂志亲自审稿、校阅，详尽地指出编辑出版中存在的每一个问题，为杂志在发展初期树立严谨的编辑准绳，设立规范的编校标杆，为杂志的快速发展和编辑人才的培养奠定了坚实基础。一直以来我们谨记他的悉心指导和殷切期望，目前《中国材料进展》已是中文核心、科技核心及 SCOPUS 数据库等多个数据库来源期刊，是我国材料领域不可或缺的、特色鲜明的重要学术期刊之一。杂志的每一个进步，都是对他的告慰！

胡壮麒院士虽然离开了我们，但他严谨的学术精神将永远伴随着我们继续前行！

我们沉痛悼念胡壮麒院士！深切怀念胡壮麒院士！

胡壮麒院士千古！

(本刊通讯员)

