

引用格式: DENG Lingling, SONG Jiacheng, GUO Jintao, et al. Research on the Performance of Low Roughness Silver Nanowire Transparent Electrode Based on AgNW:HPMC Embedded Structure [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51 (3): 0316001

邓玲玲, 宋家成, 郭金涛, 等. 基于 AgNW:HPMC 嵌入结构的低粗糙度银纳米线透明电极性能研究[J]. 光子学报, 2022, 51 (3):0316001

基于 AgNW:HPMC 嵌入结构的低粗糙度银纳米线透明电极性能研究

邓玲玲, 宋家成, 郭金涛, 郑加金

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院, 南京 210023)

摘 要:将银纳米线与不同浓度的羟丙基甲基纤维素以一步混合的方法制备导电银浆,旋涂并热压制备具有嵌入式结构的复合透明电极。分别改变银纳米线和羟丙基甲基纤维素的混合比例,研究其比例对电极光电性能、粗糙度和稳定性的影响。结果表明,一步法得到的导电银浆可以有效制备嵌入式结构透明电极,显著改善银纳米线电极的平整性和稳定性。电极中羟丙基甲基纤维素的增加对电极的光电性能影响较小,但是极大降低了电极的粗糙度。最优化电极的平均表面均方根粗糙度仅为 4.6 nm。羟丙基甲基纤维素对银纳米线的保护使透明电极在强氧化环境和胶带测试下均可保持良好的稳定性。

关键词:银纳米线;羟丙基甲基纤维素;透明导电薄膜;低粗糙度;高稳定性

中图分类号:TN27

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225103.0316001

0 引言

21 世纪以来,随着互联网的高速发展,越来越多的电子产品走进人们的生活,极大丰富了人们的日常生活。随着电子器件不断向柔性化、轻薄化的可穿戴设备发展,柔性透明电极的研发已成为新型电子器件,尤其是新型光电器件领域的重要研究内容,制备具有良好弯曲性、导电性、透明度和稳定性的柔性电极是获得高性能柔性光电器件的重要课题^[1]。目前最常用的透明电极材料是氧化铟锡(ITO),其具有高的光透过率、低的电阻以及稳定的化学特性^[2-3]。然而 ITO 电极制备工艺复杂,易发生开裂,这些特点限制了其在柔性光电器件中的应用^[4]。

近年来,寻找替代性透明电极引起了越来越多研究者的关注,并开发出很多替代材料,包括金属栅格^[5]、石墨烯^[6]、碳纳米管^[7]、导电高分子^[8-9]、金属纳米线^[10-12]等。在众多有发展潜力的柔性透明电极材料中,银纳米线(AgNW)以其优越的光学性能、电学性能、机械性能^[13],以及简单的制备方式,受到研究人员的广泛关注。但是,AgNW 电极制备过程中的一些问题使电极性能受到影响。比如,在银纳米线成膜过程中,由于 AgNW 网络都是随机分布,线与线之间相互搭连增加了 AgNW 电极的接触电阻,同时搭接形成的凸起导致膜层表面粗糙度较高^[14-15],不利于其在薄膜光电器件中的广泛应用;此外,银纳米线本身易氧化以及与衬底之间粘附性差,导致 AgNW 电极在用于柔性器件时的稳定性较差,不利于其在实际情况中的推广和应用。

针对以上问题,研究者们提出很多解决方案。比如通过退火^[16-17]、激光照射^[18-19]、卤化物溶液浸泡^[20-21]等方式,使银纳米线的连接处发生焊接,增大线与线之间的接触面积,降低薄膜的方阻和粗糙度。焊接法能有效降低银纳米线薄膜的方阻,但是对粗糙度的改善效果不明显。而将银纳米线旋涂在平滑衬底上后再通过剥离转移到目标衬底上,可以得到稳定性和粗糙度都很优异的导电薄膜^[22-23],但是剥离法对工艺操作要求较高,不适用于大范围推广。近年来,生物聚合物,如壳聚糖(Chitosan, Chi)、海藻酸钠、羟丙基甲基纤维素

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 91833306),国家自然科学基金(Nos. 61505086, 61705111)

第一作者:邓玲玲(1976—),女,副教授,博士,主要研究方向为有机发光器件的设计、制备以及性能分析。Email: dengll@njupt.edu.cn

通讯作者:郑加金(1976—),男,副教授,博士,主要研究方向为光电子材料与器件、光纤光子学。Email: zhengjj@njupt.edu.cn

收稿日期:2021-07-22;录用日期:2021-09-28

<http://www.photon.ac.cn>

(Hydroxypropyl Methyl Cellulose, HPMC)等,因其具有好的成膜性、透明度、稳定性和绿色环保的特性而被引入 AgNW 电极的制备中,在改善电极粗糙度、稳定性方面取得了出色的效果^[24-27],并拓宽了 AgNW 电极在不同衬底上的应用^[26]。目前,将生物聚合物引入银纳米线电极的方法主要为采用双层结构制备复合透明电极,比如 JIN Yunxia^[27]等将壳聚糖旋涂在 AgNW 薄膜上,通过控制壳聚糖膜层的厚度,制备出的 AgNW/Chi 复合导电薄膜的粗糙度仅为~7 nm,且导电薄膜与衬底间的粘附性以及有机环境中的稳定性均得到明显改善。或者首先在衬底上制备一层聚合物薄膜,然后再制备 AgNW 层,借助一定压力使 AgNW 部分嵌入聚合物薄膜中^[24-25]。通过这种方法可以使透明电极的方阻和粗糙度都显著降低,同时聚合物为 AgNW 提供了很好的保护和附着力,有效提高了透明电极的稳定性。在上述双层结构的银纳米线复合透明电极中,由于聚合物的绝缘性和聚合物膜层在溶液制备过程中易被溶解的特点,所以聚合物层厚度对透明电极的性能有重要的影响,这对制备过程的控制提出了较高的要求。

为了降低复合透明电极制备过程中对聚合物层厚度控制的要求,本工作将 HPMC 与 AgNW 按照一定比例直接混合,然后旋涂制备 AgNW:HPMC 嵌入式复合透明电极。HPMC 是一种透光性好、易溶解、粘度较高的聚合物,常作为分散剂少量加入 AgNW 溶液中辅助 AgNW 分散^[28],改善电极的均匀性。在这里,较高质量分数的 HPMC 被加入 AgNW 溶液,使得 AgNW 分散在 HPMC 中形成嵌入式结构,并研究了 HPMC 浓度对导电薄膜各项性能的影响。研究表明,直接混合制备 AgNW 复合导电薄膜的方法简单有效,HPMC 的加入可以在保证薄膜的导电性和透光性变化较小的情况下,显著降低 AgNW 薄膜表面的粗糙度,同时有效提高导电薄膜的稳定性。此外,直接混合的实验操作使 AgNW 透明电极制备过程的可控性和可重复性均较好。

1 实验过程

1.1 基于 HPMC 的导电银浆的制备

分别称取 13.5 mg、22.5 mg、31.5 mg 的 HPMC,各加入 4.5 mL 去离子水,搅拌 6 h 使其充分溶解,得到浓度分别为 0.3 wt%、0.5 wt%、0.7 wt% 的 HPMC 水溶液。再分别取 1.5 mL AgNW 原液加入配好的 HPMC 溶液中,轻轻摇晃使 AgNW 与 HPMC 溶液充分混合,制备出分散均匀的 AgNW 导电银浆。通过这一过程得到的导电银浆,银纳米线分散液的浓度为 2 mg/mL,AgNW:HPMC 的比例分别约为 1:1、1:2 和 1:3。所用的银纳米线原液购买自浙江科创新材料科技有限公司,平均直径为 45 nm,平均长度为 30 μm 。

1.2 银纳米线电极的制备

采用旋涂法在 2 cm \times 2 cm 玻璃片或超薄 PET 柔性衬底上制备银纳米线透明电极。将基底分别浸泡于丙酮、无水乙醇与去离子水中,各超声清洗 20 min,用氮气吹干后放入烘箱烘干。将处理过的基底进行紫外臭氧处理 20 min,以提高其亲水性。控制旋涂转速为 2 500 r/min,旋涂时间为 40 s,将处理后的基底固定在旋涂仪上,用移液枪取 200 μL 上步骤制备的导电银浆滴在基底上,开始旋涂步骤。旋涂仪的高速转动使导电银浆迅速铺展开,形成透明导电薄膜。最后,对导电薄膜进行热压处理。

1.3 性能测试

薄膜的方阻使用双电测数字式四探针测试仪(ST2263)在室温下测得;薄膜的透光率使用紫外/可见分光光度计(LAMBDA 35)在室温下测得;薄膜表面形态用光学显微镜(Carl Zeiss9-21)、扫描电子显微镜(日立 S-4800)、原子力显微镜(Dimension icon)表征。

2 结果与讨论

HPMC 作为聚合物,其导电性较差。为了明确 HPMC 与银纳米线混合后对透明电极导电性的影响,对三种不同混合比例的 AgNW:HPMC 复合电极和未掺入 HPMC 的初始 AgNW 电极的方阻进行测试,其结果如图 1(a)。

从图中可以看到,没有加入 HPMC 的初始 AgNW 电极的平均方阻为 18.2 Ω/sq 。而对于 AgNW:HPMC 复合电极,随着 HPMC 的比例升高,电极方阻略微上升,分别为 21.4 Ω/sq 、22.3 Ω/sq 和 23.1 Ω/sq 。方阻增加的现象一方面源于 HPMC 的绝缘性,另一方面则可能是 HPMC 的加入使单位面积内 AgNW 数量有所减少。

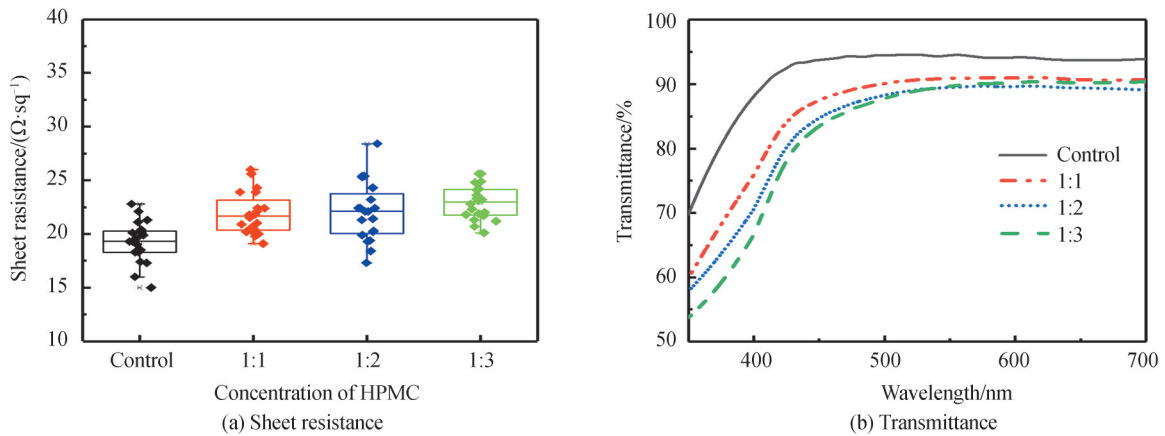


图1 不同比例AgNW:HPMC透明电极的方阻和透光率

Fig. 1 Sheet resistance and transmittance of AgNW:HPMC composite transparent electrodes with different proportions

图2为不同比例的AgNW:HPMC透明电极的显微图。在没有掺HPMC的初始AgNW电极中,银纳米线排列比较紧密,而在掺入HPMC后,银纳米线的数量有所减少,反映出HPMC的加入对银纳米线的分散作用。其中较低比例1:1下,HPMC对银纳米线的分散效果比较明显,AgNW的密度较低,而较高比例的HPMC则使AgNW溶液比较粘稠,AgNW的密度又有所增加。HPMC自身的绝缘性虽然对AgNW:HPMC电极的导电性能有一定的影响,但是电极仍然保持了较低的方阻,仍能确保其在实际器件中的稳定应用。图1(b)为不同混合比例AgNW:HPMC透明电极的透过率。加入HPMC后,由于HPMC填充了AgNW之间的间隙,因此电极的透过率有所降低,随着HPMC比例增加,在550 nm处的透过率从初始的94.3%依次降为91.1%,89.5%和89.0%。根据文献^[29]可知,AgNW电极的方阻为20 Ω/sq 左右时,电极在550 nm处的透过率一般为90%左右,本文所制备的AgNW电极具有比较出色的光电综合性能。通过对AgNW:HPMC透明电极方阻和透过率变化的分析,不难发现HPMC的加入虽然对电极的光电性能有轻微的影响;但在不同HPMC比例下,电极的光电性能基本保持不变。AgNW:HPMC透明电极的性能对HPMC比例不敏感的特性,有助于电极制备过程的稳定且可重复。

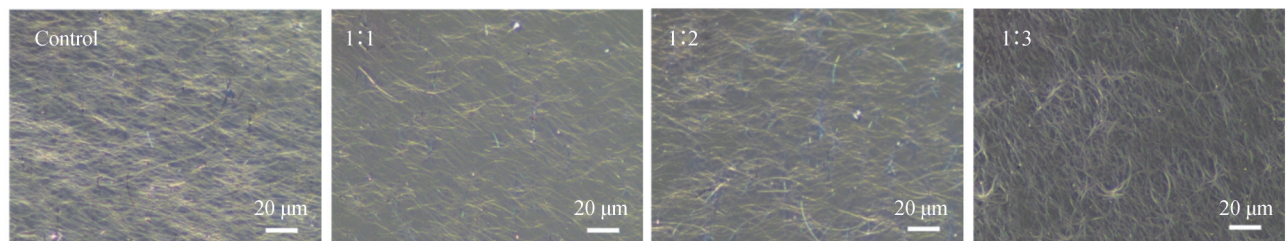


图2 不同比例AgNW:HPMC透明电极的显微图

Fig. 2 Micrograph of AgNW:HPMC composite transparent electrodes with different proportions

AgNW:HPMC透明电极的具体表面形貌是决定其能否真正用于薄膜光电器件的一个关键因素。采用SEM和AFM表征AgNW:HPMC电极的形貌,所得扫描图像如图3。由图3(a)可以看到,随着HPMC比例增加,AgNW之间区域的亮度逐渐增大,表明间隙区域逐渐被HPMC填充,AgNW和HPMC形成了互相嵌入的结构。图3(b)以及图3(c)中的高度扫描进一步表征了这种嵌入结构对电极表面粗糙度的影响。初始AgNW电极中由于纳米线之间存在团聚以及相互堆叠,虽然经过简单的热压处理,电极表面的粗糙度仍然较高,其均方根粗糙度(RMS)为23.4 nm。而在AgNW:HPMC电极中,HPMC在辅助AgNW分散,减少AgNW团聚的同时,填充了AgNW间隙区域,因此电极的表面粗糙度显著降低。随着HPMC比例增加,AgNW与HPMC之间的相互嵌入不断增强,电极表面粗糙度不断降低。当AgNW:HPMC的比例为1:3时,电极的RMS降低至4.6 nm,实现了良好的表面平整度^[25,27,30]。图3(c)的高度扫描数据也进一步验证了HPMC的掺入有效降低了电极表面的高度起伏,改善了电极粗糙度。由以上AgNW:HPMC电极的形貌表

征可以看出,通过将AgNW与较高浓度HPMC一步混合的方法,可以很容易形成嵌入式结构,在基本不影响电极光电性能的基础上,有效降低电极的粗糙度,从而保证其在有机发光二极管和太阳能电池等薄膜光电器件中的应用。

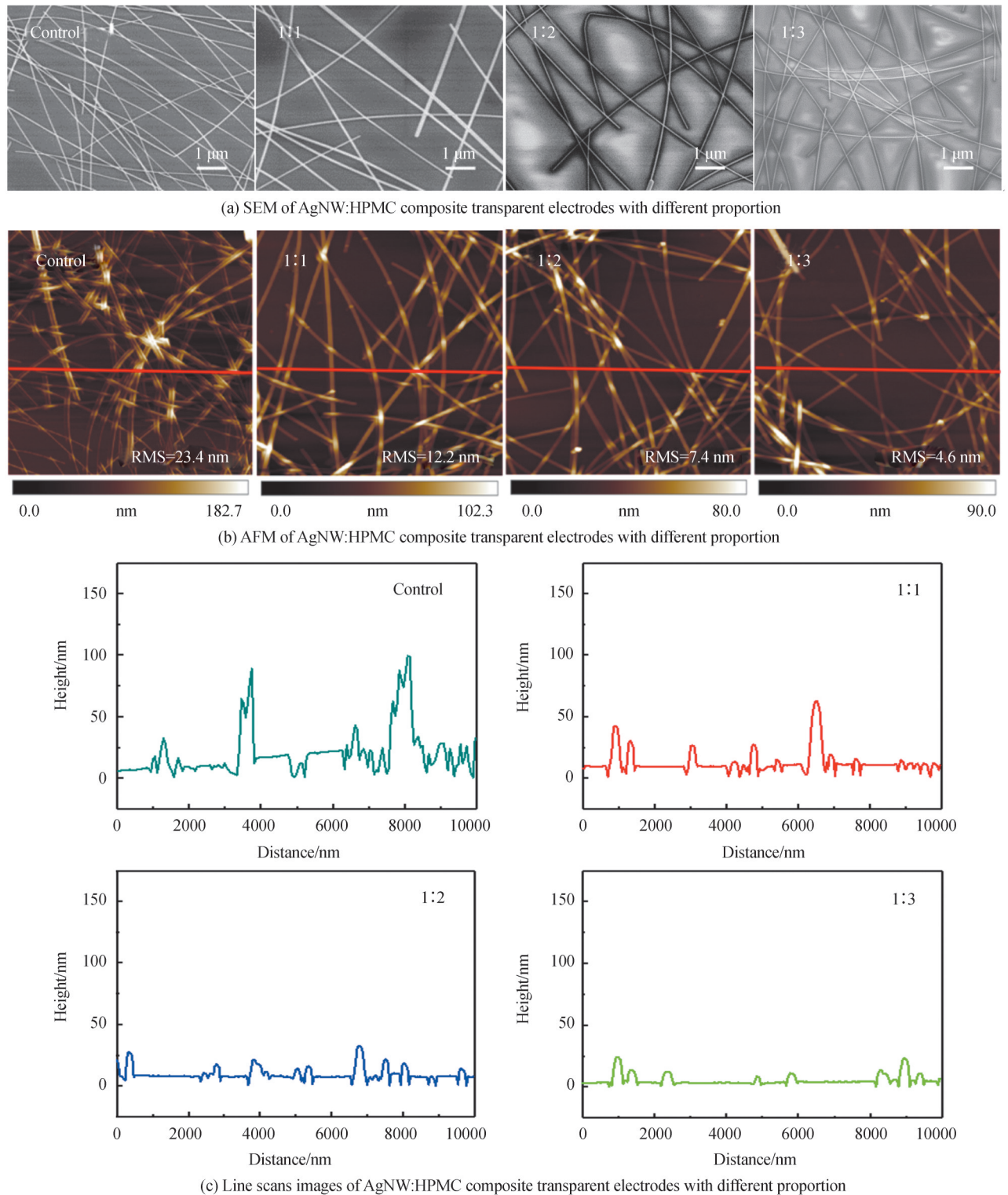
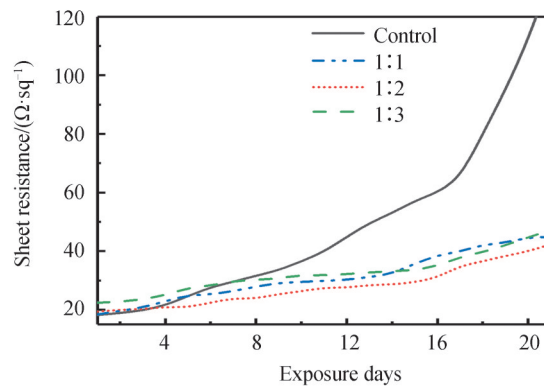


图3 不同比例AgNW:HPMC透明电极的SEM、AFM和高度扫描图像

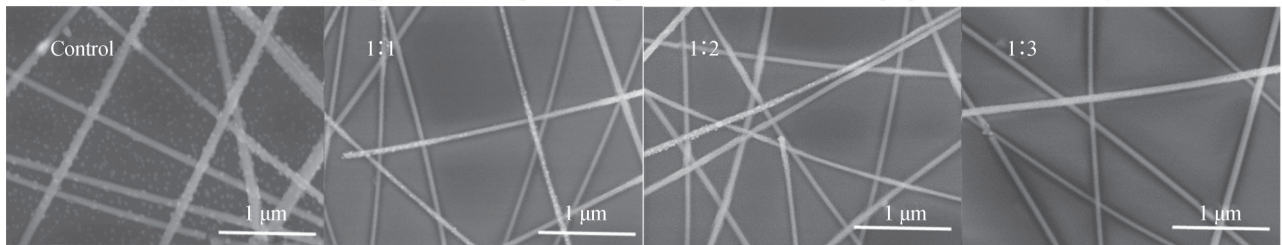
Fig. 3 SEM, AFM and line scan images of AgNW:HPMC composite transparent electrodes with different proportions

透明电极的稳定性也是考察电极的实际应用价值的重要指标。由于银纳米线电极由金属纳米材料组成,易受到空气中水氧的侵袭,因此提高其稳定性也是AgNW电极研究中的一项重要任务。将电极放置在

空气中,测试其方阻随放置天数的变化以了解AgNW:HPMC电极的稳定性,结果如图4(a)。随着电极在空气中暴露的时间延长,未掺入HPMC的初始AgNW电极的方阻迅速上升,第七天后就超过了AgNW:HPMC电极的方阻,第21天其方阻已不可测得,表明其已基本失去导电性。而对于AgNW:HPMC复合透明电极,由于AgNW和HPMC形成嵌入结构,HPMC可对AgNW起到有效的保护作用,使得电极的方阻增加缓慢。暴露在空气中21天后,三种比例复合电极的方阻分别上升至44.2 Ω/sq 、42.3 Ω/sq 和47.7 Ω/sq ,其方阻增加速率远低于初始AgNW电极。对放置在空气中21天^[25,31]的各电极进行SEM表征,结果如图4(b)。在未掺入HPMC的初始AgNW电极中,由于AgNW完全暴露于空气,极易发生氧化反应生成不导电的氧化银,因此21天后的初始AgNW电极表面布满氧化银颗粒,极大地影响了AgNW的导电性,导致电极方阻快速增加。而在AgNW:HPMC电极中,在HPMC的包裹下,AgNW与氧气之间的氧化反应被明显抑制,AgNW表面只有少量氧化银颗粒形成,因此电极的导电性得到较好的维持,方阻变化较小。



(a) Sheet resistance of AgNW:HPMC composite transparent electrodes with different proportions in air for 21 days



(b) SEM of AgNW:HPMC composite transparent electrodes with different proportion in air for 21 days

图4 不同比例AgNW:HPMC透明电极暴露在空气中的方阻变化和21天后的SEM图像

Fig. 4 Sheet resistances and SEM images of AgNW:HPMC composite electrodes with different proportions in air for 21 days

溶液法是制备薄膜光电器件的常规方法。为使功能层在透明电极表面更好地成膜,对AgNW薄膜表面亲水性提出了更高的要求,而紫外臭氧处理是改善膜层亲水性的常用方法。HPMC对AgNW电极的保护,还体现在采用紫外臭氧处理AgNW电极表面的过程中。将制备的电极放置在紫外灯下,进行UV照射处理,根据方阻的变化和膜层表面的形态来研究电极的稳定性。图5(a)为AgNW初始电极和不同比例的AgNW:HPMC电极的方阻随UV处理时间的变化关系。从中可以看出,随着UV处理时间的延长,初始AgNW电极方阻迅速增加,并在10 min后失去导电性,而AgNW:HPMC电极的方阻随UV处理时间的增大比较缓慢。图5(b)是AgNW电极在UV处理前后的照片,从中可以看到初始电极在经过15 min的UV处理后,电极表面明显变黑,这层黑色的物质是银纳米线在紫外光源的作用下,被氧化生成的氧化银^[32]。而加入了HPMC的透明电极,在整个UV处理的过程中,表面形态几乎不变。比例分别为1:1、1:2和1:3的AgNW:HPMC透明电极的方阻分别增加到35.4 Ω/sq 、34.3 Ω/sq 和31.2 Ω/sq ,总体上升仅为25%左右。这说明AgNW嵌入HPMC的结构能够有效保护AgNW,使其不被外界的强氧化环境所氧化,在实际的薄膜光电器件制备中有实用的价值。

AgNW在衬底上的粘附性在一定程度上决定了柔性器件的力学稳定性。粘附性越强,衬底上的AgNW越不易在外力作用下剥离脱落,电极也就越适用于柔性器件^[30]。通过对初始AgNW电极以及AgNW:

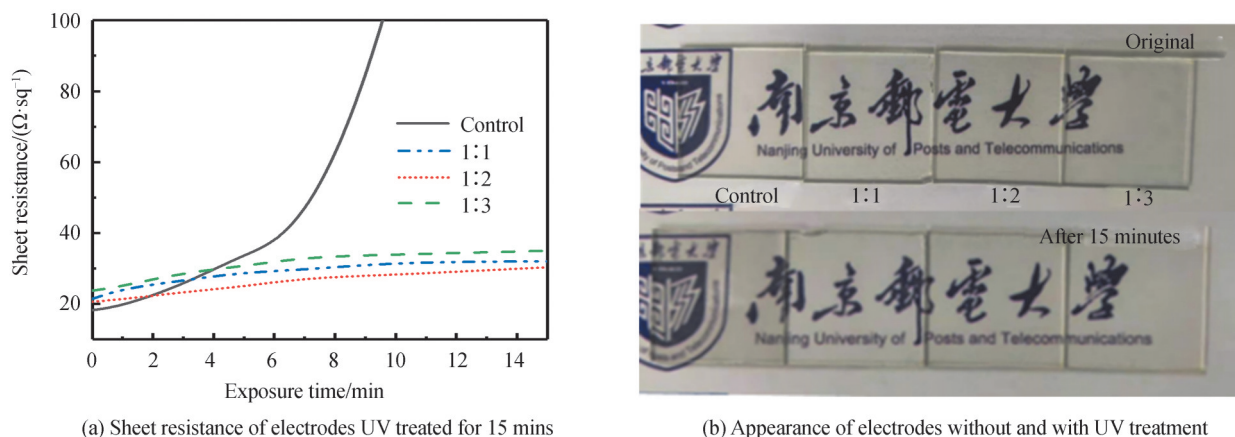


图5 不同比例AgNW:HPMC透明电极经UV处理前后的方阻变化和照片

Fig. 5 Sheet resistance and appearance of AgNW:HPMC composite transparent electrodes with different proportions without and with UV treatment

HPMC复合电极进行胶带测试以表征电极的粘附性,在电极表面粘贴胶带随后剥离,电极表面形貌与方阻的变化可以在一定程度上体现粘附性的好坏。图6为AgNW初始电极和混合比例为1:1的AgNW:HPMC透明电极进行胶带测试前后的照片和胶带测试区域的SEM图像,这次的胶带测试在电极的右侧区域进行。从图6中照片可以看到在胶带测试后,初始AgNW电极右侧区域的颜色相对于未进行胶带测试的左侧区域出现了明显的变化,表明右侧区域的AgNW膜层被破坏。而AgNW:HPMC电极的整个区域仍然保持着比较均匀的膜层形态。图6(a)和6(b)中胶带测试后的SEM图像清晰反映出,在初始AgNW电极中大量的AgNW被胶带粘附带走,同时还可以观察到部分银纳米线因为胶带粘附而发生了断裂。而AgNW:HPMC电极的SEM测试结果表明,电极中的AgNW在胶带测试之后基本被完整保护下来。经过胶带测试后,初始AgNW电极较难测出方阻,而加入HPMC后的复合AgNW电极的方阻基本保持不变。可见AgNW和HPMC形成的嵌入结构有效增强了AgNW与衬底之间的粘附性,可以提高AgNW电极的力学稳定性,帮助AgNW电极应用于柔性光电器件中。

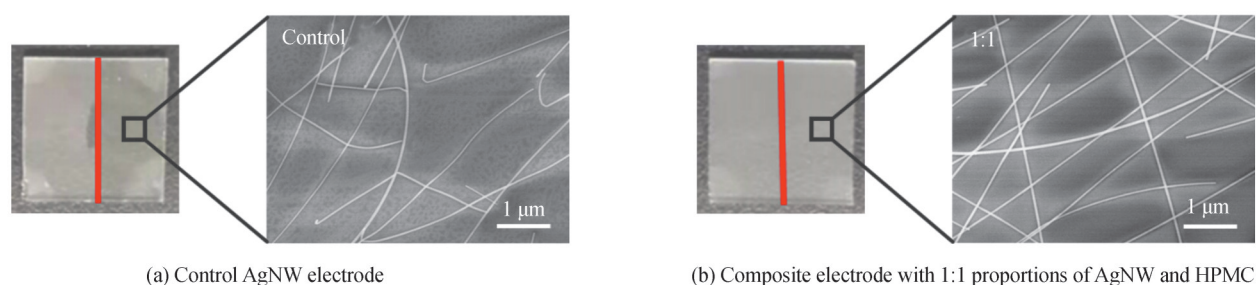


图6 胶带测试前后的AgNW电极形貌和SEM图

Fig. 6 Appearance and SEM of AgNW electrode before and after tape test

3 结论

本文采用聚合物HPMC与AgNW一步混合的工艺,制备了的AgNW:HPMC透明电极,研究了AgNW和HPMC的混合比例对电极各项性能的影响。实验结果表明,HPMC与AgNW一步混合制备复合透明电极,使电极的导电性和透光率略有降低,且混合比例对导电性与透光性降低程度影响较小。AgNW与HPMC混合后形成的嵌入式结构可极大改善AgNW薄膜的平整度,使薄膜的表面粗糙度低至4.6 nm。同时HPMC对AgNW起到良好的保护作用,使电极在空气和紫外光等严苛环境中保持稳定方阻。此外,HPMC和AgNW的相互嵌入还提高了AgNW和衬底之间的粘附性,使AgNW:HPMC电极在外力作用下表现出好的力学稳定性。本文所采用的AgNW:HPMC透明电极的制备工艺简单、可重复率高、薄膜性能稳定,在柔性光电薄膜器件领域中有潜在的应用价值。

参考文献

- [1] NAIR N M, PAKKATHILLAM J K, KUMAR K, et al. Printable silver nanowire and PEDOT:PSS nanocomposite ink for flexible transparent conducting applications[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(4): 1000-1010.
- [2] JIN Yunxia, LI Lu, CHENG Yuanrong, et al. Cohesively enhanced conductivity and adhesion of flexible silver nanowire networks by biocompatible polymer sol-gel transition[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(10): 1581-1587.
- [3] ZHU Yanzhe, WAN Tao, GUAN Peiyuan, et al. Improving thermal and electrical stability of silver nanowire network electrodes through integrating graphene oxide intermediate layers[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 566: 375-382.
- [4] GAO Jinwei, PEI Ke, SUN Tianyi, et al. Transparent nanowire network electrode for textured semiconductors[J]. *Small*, 2013, 9(5): 732-732.
- [5] KANG M G, GUO L J. Nanoimprinted semitransparent metal electrodes and their application in organic light-emitting diodes[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(10): 1391-1396.
- [6] LIU Nan, CHORTOS A, LEI Ting, et al. Ultratransparent and stretchable graphene electrodes[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): 1700159.
- [7] ZHU Sheng, NI Jiangfeng, LI Yan. Carbon nanotube-based electrodes for flexible supercapacitors[J]. *Nano Research*, 2020, 13(7): 1825-1841.
- [8] WEI Bingwu, WU Xinkai, LIAN Li, et al. A highly conductive and smooth AgNW/PEDOT:PSS film treated by hot-pressing as electrode for organic light emitting diode[J]. *Organic Electronics*, 2017, 43: 182-188.
- [9] YUKSEL R, EKBER A, TURAN J, et al. A novel blue to transparent polymer for electrochromic supercapacitor electrodes[J]. *Electroanalysis*, 2018, 30(2): 266-273.
- [10] ZHAI Qingfeng, WANG Yan, GONG Shu, et al. Vertical gold nanowires stretchable electrochemical electrodes[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(22): 13498-13505.
- [11] ZHANG He, WANG Shang, TIAN Yanhong, et al. High-efficiency extraction synthesis for high-purity copper nanowires and their applications in flexible transparent electrodes[J]. *Nano Materials Science*, 2020, 2(2): 164-171.
- [12] XU Donghua, QIU Jingshen, WANG Yucheng, et al. Chitosan-assisted buffer layer incorporated with hydroxypropyl methylcellulose-coated silver nanowires for paper-based sensors[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(6): 65002.
- [13] KIM J H, TRIAMBULO R E, PARK J W, et al. Effects of the interfacial charge injection properties of silver nanowire transparent conductive electrodes on the performance of organic light-emitting diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(10): 1-10.
- [14] MA Chi, GAO Xiumin, BI Yangang, et al. PFSA-passivated silver nanowire transparent electrodes for highly flexible organic-light-emitting devices with improved stability[J]. *Organic Electronics*, 2020, 84: 105727.
- [15] KIM C L, JUNG C W, OH Y J, et al. A highly flexible transparent conductive electrode based on nanomaterials[J]. *Npg Asia Materials*, 2017, 9: e438.
- [16] KIM C L, LEE J Y, SHIN D G, et al. Mechanism of heat-induced fusion of silver nanowires[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 9271.
- [17] SHINDE M A, LEE D J, KIM B J, et al. Highly conductive and smooth surfaced flexible transparent conductive electrode based on silver nanowires[J]. *Thin Solid Films*. 2019, 685: 366-371.
- [18] HU Youwang, LIANG Chang, SUN Xiaoyan, et al. Enhancement of the conductivity and uniformity of silver nanowire flexible transparent conductive films by femtosecond laser-induced nanowelding[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(5): 673.
- [19] JIU Jinting, SUGAHARA T, NOGIMI, et al. High-intensity pulse light sintering of silver nanowire transparent films on polymer substrates: the effect of the thermal properties of substrates on the performance of silver films[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(23): 11820-11828.
- [20] WU Ying, WANG Zhenyu, LIU Xu, et al. Ultralight graphene foam/conductive polymer composites for exceptional electromagnetic interference shielding[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(10): 9059-9069.
- [21] LIN Xiuzhen, CHEN Shuming, YU Jianning, et al. Enhanced conductivity of transparent and flexible silver nanowire electrodes fabricated by a solution-processed method at room temperature[J]. *Thin Solid Films*, 2017, 624: 54-60.
- [22] ZENG Xiaoyan, ZHANG Qikai, YU Rongmin, 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.
- [23] LIU Guishi, QIU Jingshen, XU Donghua, et al. Fabrication of embedded silver nanowires on arbitrary substrates with enhanced stability via chemisorbed alkanethiolate[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(17): 15130-15138.
- [24] JIN Yunxia, LI Lu, CHENG Yangrong, et al. Cohesively enhanced conductivity and adhesion of flexible silver nanowire networks by biocompatible polymer sol-gel transition [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(10): 1581-1587.
- [25] LIAN Lu, DONG Dan, YANG Shuai, et al. Highly conductive and uniform alginate/silver nanowire composite transparent electrode by room temperature solution processing for organic light emitting diode[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, 9(13): 11811-11818.

- [26] HA J Y, SOSNOWCHIK B D, LIN Liwei, et al. Patterned growth of tio₂ nanowires on titanium substrates[J]. Applied Physics Express, 2011, 4(6): 065002.
- [27] JIN Yunxia, SUN Yong, WANG Kaiqing, et al. Long-term stable silver nanowire transparent composite as bottom electrode for perovskite solar cells[J]. Nano Research, 2018, 11(4): 1998-2011.
- [28] YANG Hui, BAI Shengchi, CHEN Tianrui, et al. Facile fabrication of large-scale silver nanowire-pedot: pss composite flexible transparent electrodes for flexible touch panels[J]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 086315.
- [29] LI Wenting, ZHANG Huan, SHI Shengwei, et al. Recent progress of silver nanowire networks for flexible organic electronics[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(14): 4636-4674.
- [30] JIN Yunxia, WANG Kaiqing, CHENG Yuanrong, et al. Removable large-area ultrasmooth silver nanowire transparent composite electrode[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(5): 4733-4741.
- [31] LEE E, AHN J, KWON H C, et al. All-solution-processed silver nanowire window electrode-based flexible perovskite solar cells enabled with amorphous metal oxide protection[J]. Advanced Energy Materials, 2017, 8(9): 1702182.
- [32] DAO V H, MAPLEBACK B J. Generation of highly porous silver nanowire networks by plasma treatment and their direct application as supercapacitor electrodes[J]. Nanoscale, 2020, 12(22): 11868-11877.

Research on the Performance of Low Roughness Silver Nanowire Transparent Electrode Based on AgNW:HPMC Embedded Structure

DENG Lingling, SONG Jiacheng, GUO Jintao, ZHENG Jiajin

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: A conductive silver paste is prepared by mixing Ag Nanowires (AgNW) with different concentrations of Hydroxypropyl Methyl Cellulose (HPMC) in one-step process, and then a composite transparent electrode with Ag nanowires embedded in HPMC (AgNW:HPMC) is prepared by spin coating and subsequent hot pressing. The mass ratio of Ag nanowires and HPMC is changed by 1:1, 1:2 and 1:3, and its effects on the photoelectric properties, roughness and stability of the transparent electrode were investigated. The results show that the conductive silver paste obtained by the one-step process can effectively prepare composite transparent electrodes with excellent performance. Increasing the ratio of HPMC in the conductive silver paste slightly decreases the conductivity and transparent of the AgNW:HPMC composite electrode due to the insulating and compactness properties of HPMC. While the flatness of the AgNW:HPMC composite electrodes is significantly improved with HPMC filling the empty space between the silver nanowires. The surface roughness decreases with increasing the proportion of HPMC, and the lowest Root-Mean-Square (RMS) roughness is only 4.6 nm when the mass ratio of Ag nanowires and HPMC is 1:3. In addition, the composite electrodes with Ag nanowires embedded in HPMC exhibit remarkable stability under extreme conditions. When the nanowire electrode is exposed in atmosphere, HPMC can protect Ag nanowire from the corrosion of water and oxygen. The sheet resistance of the AgNW:HPMC electrode was doubled while the neat Ag nanowire electrode had lost its electrical conductivity after the electrodes were exposed in atmosphere for 21 days. Besides, HPMC can help the composite electrode maintain good photoelectric performance under the strong oxidative environment irradiated by ultraviolet light source. After 15 minutes of ultraviolet treatment, the sheet resistance only increased by 25%. Moreover, the adhesion properties of the AgNW:HPMC composite electrode is improved because HPMC strengthens the contact between the silver nanowires and the substrate, and the good photoelectric performance and surface morphology are still maintained under the destructive test with tape.

Key words: Silver nanowires; HPMC; Transparent conductive film; Low roughness; High stability

OCIS Codes: 160.4236; 160.4760; 310.6870