

文章编号:1007-2780(2022)06-0694-09

基于银纳米线透明电极制备柔性电致变色器件

邸永跃¹, 施肖锋¹, 高维廉¹, 贾梦伟¹, 张 婕^{1,2*}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江南大学 江苏省食品先进制造与装备重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:透光率可调节的电致变色(EC)器件在光电子领域有着巨大的应用潜力。目前绝大多数电致变色器件都是基于氧化铟锡(ITO)透明电极和无机氧化钨(WO₃)电致变色材料,机械柔性较差。本文采用多元醇法合成的银纳米线(AgNWs),有机电致变色材料(P3HT)和(PEDOT:PSS)替代 ITO 与 WO₃制备柔性 EC 器件,并利用高透光率的 ZnO 涂层增强 AgNWs 与柔性基底的粘附性,以及改善 AgNWs 之间的节点接触从而优化 AgNWs 网格的相互连接,使得 AgNWs 柔性透明电极的表面电阻由 69.9 Ω/□减小为 45.8 Ω/□。另外通过在 PVA 水溶液中掺入 LiBF₄进行冷冻,得到离子导电率为 1.53×10⁻² S/cm 的凝胶电解质,利用该高导电率的凝胶电解质充当对电极层简化 EC 器件,使得 EC 器件整体具有更高的透光率,制备出最大光调制范围为 37.8% 的 PEDOT:PSS EC 器件和最大光调制范围为 17.7% 的 P3HT EC 器件。最后利用中国传统毛笔书写和大面积丝网印刷的方式制备个性化图案的 PEDOT:PSS EC 器件,具有很好的显示效果。

关键词:银纳米线;柔性透明电极;凝胶电解质;电致变色

中图分类号:TM241;TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0022

Fabrication of flexible electrochromic devices based on silver nanowires transparent electrode

DI Yong-yue¹, SHI Xiao-feng¹, GAO Wei-lian¹, JIA Meng-wei¹, ZHANG Jie^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu State Key Lab of Advanced Food Manufacturing and Equipment, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Electrochromic devices have great application potential in the field of optoelectronics. At present, most electrochromic devices are based on indium tin oxide (ITO) transparent electrode and inorganic tungsten oxide (WO₃) electrochromic materials, which have poor mechanical flexibility. In this paper, silver nanowires (AgNWs) synthesized by polyol method were used to prepare flexible transparent electrodes that could replace ITO material. ZnO coating with high light transmittance was used to enhance the adhesion between AgNWs and flexible substrate and improve the node contact between AgNWs to optimize the interconnection of AgNWs grid. The sheet resistance of AgNWs flexible transparent electrode decreases

收稿日期:2022-01-22;**修订日期:**2022-03-03.

基金项目:江苏省产业前瞻与共性关键技术资助项目(No. BF2017069);中央高校基本科研基金(No. JUS-RP11946)

Supported by Jiangsu Industrial Foresight and Generic Key Technology Funding Project (No. BF2017069);
Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. JUSRP11946)

*通信联系人, E-mail: jiezhang@jiangnan.edu.cn

from $69.9 \Omega/\square$ to $45.8 \Omega/\square$. A gel electrolyte with ionic conductivity of $1.53 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ was obtained by freezing PVA aqueous solution with LiBF_4 . The gel electrolyte with high conductivity was used to replace the electrode to simplify the EC device, so that the EC device had a higher overall transmittance. A PEDOT:PSS EC device with a maximum optical modulation range of 37.8% and a P3HT EC device with a maximum optical modulation range of 17.7% were fabricated. Finally, the PEDOT:PSS EC device with personalized pattern is prepared by using traditional Chinese brush writing and large-area screen printing, which has a good display effect.

Key words: silver nanowires; flexible transparent electrode; gel electrolyte; electrochromic

1 引言

伴随着工业界对柔性电子技术的需求增加,柔性功能材料^[1]、制造工艺^[2]以及柔性光电器件^[3]性能不断发展和突破。其中在电致发光(EL)^[4]、有机光伏电池(OPVs)^[5]、电致变色(EC)^[6-9]以及柔性触控面板^[10]等器件应用较为广泛。由于电致变色器件能够实现可见光(Vis)和近红外(NIR)区域的透射率动态调制,广泛应用于智能窗户、防眩镜和电子显示等领域,并且因其工作电压低、开关速度快、成本低等特点,已成为研究热点。

作为EC等柔性电子器件最基础的柔性透明电极^[11]的研究也获得更多关注,目前商业透明电极材料多采用光电性能较好的ITO^[12],但ITO材料较脆的特点已经不能满足柔性需求,同时金属材料稀有、价格昂贵以及制备工艺复杂,故而需要研究柔性透明导电材料代替ITO的运用。目前用于代替ITO导电材料的有碳纳米管(CNTs)^[13]、金属纳米线^[14]、金属网格^[15]以及石墨烯^[16]等导电材料。其中金属纳米线的光电性能较好,由于金纳米线价格昂贵以及铜纳米线易氧化导致电阻变高等缺点限制其广泛应用。而银纳米线(AgNWs)^[17-18]因其容易大量制备、较高的机械柔性和光电性能等特点被越来越多的研究人员所重视,也是未来最具有代替ITO潜力的电极材料。

对于银纳米线柔性透明电极的制备多数研究使用AgNWs或其复合导电材料^[19]通过刮涂^[20]、旋涂^[21]、狭缝涂布^[22]和喷涂^[23]等涂布工艺在柔性基底上成膜形成柔性透明导电电极。由于聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)价格相对便宜、机械柔性较好且具有一定耐高温特性,故而被广泛

用于柔性透明基底材料,我们也将使用PET柔性基底制备柔性透明电极。

本文采用了多元醇法合成银纳米线,将合成纯化后的银纳米线旋涂在PET基底表面,通过旋涂一层ZnO提高银纳米线与PET之间的粘附性,并且这种ZnO涂层能改善AgNWs节点接触,优化导电网格,从而获得具有较好的光电性能、机械柔性和粘附性的柔性透明电极。最后我们通过PVA^[24]- LiBF_4 凝胶电解质代替电解质层/电极层提高EC器件的整体透光率,并利用银纳米线柔性透明电极制备PEDOT:PSS和P3HT两种电致变色器件并进行性能对比。为了用EC器件达到商标显示效果,我们采用了丝网印刷和毛笔书写的方式将PEDOT:PSS浆料印刷在银纳米线柔性透明电极表面,并通过PVA- LiBF_4 凝胶电解质组装得到图案化显示的EC器件。

2 实验

2.1 实验材料及设备

实验材料:乙二醇(EG,分析纯)、硝酸银(AgNO_3 ,分析纯)、氯化钠(NaCl ,分析纯)、乙醇胺($\geq 98\%$)、二水合醋酸锌($\geq 99.0\%$)、三氯甲烷(分析纯)、聚乙烯醇(PVA,1788)、2-甲氧基乙醇($\geq 99.8\%$)均来自国药试剂,聚乙烯吡咯烷酮(PVP,k88-96,北京伊诺凯)、PEDOT:PSS(ORGACON EL-P 3040)、P3HT(宝莱特光电)、四氟硼酸锂(LiBF_4 ,99%,damas-beta)。

仪器设备:光学形状分析显微镜(VK-X1000)和扫描电子显微镜(SEM,ZEISS)测试AgNWs的表面形貌,四探针测试仪(ST2263)测试AgNWs电极的表面电阻,紫外分光光度计(UV-1800)测

试 AgNWs 电极的透光率, 并利用紫外分光光度计和电化学工作站 (CHI760E) 对电致变色器件进行相关透光率变化进行测试以及离子电导率测试。

2.2 银纳米线合成及纯化

取 28.5 mL EG 和 0.58 g PVP 于烧瓶中, 100 °C 下搅拌 1.5 h 使其均匀溶解。待溶解完成后加入 1.5 mL 浓度为 0.3 mol/L 的 NaCl/EG 溶液, 再加入 5 mL 浓度为 0.3 mol/L 的 AgNO₃/EG 溶液, 充分搅拌 20 min, 均匀混合后停止搅拌, 加热至 150 °C 并保温 1.5 h 即可得到 AgNWs 原液。用无水乙醇与 AgNWs 原液混合摇匀以 3 000 r/min 的转速离心 10 min, 重复 3 次。最后将洗净的 AgNWs 沉淀分散在无水乙醇中制备出 4 mg/mL 的 AgNWs 分散液。合成与纯化过程如图 1 所示。

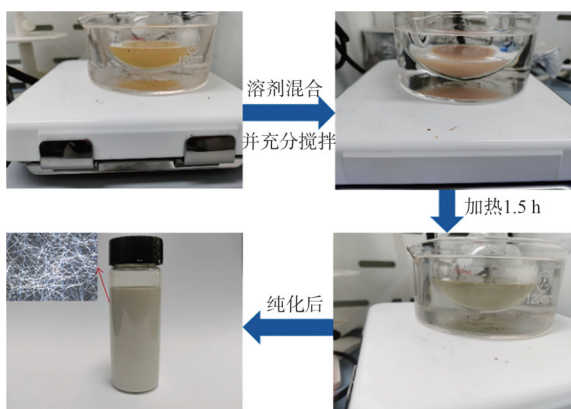


图 1 AgNWs 合成与纯化过程

Fig. 1 AgNWs synthesis and purification process

2.3 电致变色器件制备

电致变色器件的制备以及结构示意图如图 2 所示, 首先将制备好的 AgNWs 分散液以 1 500 r/min 的转速旋涂 30 s 涂布在 PET 基底表面, 并在 120 °C 的温度下退火处理 10 min, 随后将 ZnO 以 2 000 r/min 的转速旋涂 40 s 涂布在 AgNWs 上, 并在 120 °C 的温度下退火处理 20 min, 最终得到 PET/AgNWs-ZnO 柔性透明电极, 其中 ZnO 由 8 mL 2-甲氧基乙醇、500 mg 二水合醋酸锌与 140 μ L 乙醇胺混合溶解得到。随后在 PET/AgNWs-ZnO 柔性透明电极表面以 1 500 r/min 旋涂 30 s 得到一层 PEDOT:PSS 或以 2 000 r/min 旋涂 30 s 得到一层 P3HT, 并在 120 °C 的温度下退火处理

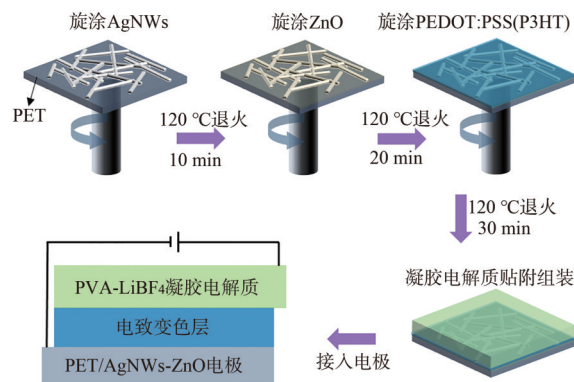


图 2 PET/AgNWs-ZnO/PEDOT:PSS (P3HT) 柔性 EC 器件制备示意图

Fig. 2 Preparation of PET/AgNWs-ZnO/PEDOT:PSS (P3HT) flexible EC device

30 min, 其中 P3HT 是由 7.2 mg P3HT 粉末于 5 mL 三氯甲烷溶解得到。最后将 PVA-LiBF₄ 凝胶电解质与 PET/AgNWs-ZnO/PEDOT:PSS (P3HT) 贴附组装得到这种基于 PEDOT:PSS (P3HT) 电致变色材料的 EC 器件, 其中 PVA-LiBF₄ 凝胶电解质由 10% (质量分数) 的 PVA 水溶液掺入 1.0 mol/L 的 LiBF₄, 并在 -20 °C 循环冷冻 24 h 得到。

3 结果与讨论

3.1 AgNWs 柔性透明电极分析

多元醇法合成的银纳米线形貌如图 3(a) 所示。通过在光学显微镜和扫描电子显微镜下测量银纳米线尺寸, 最终合成的银纳米线直径约为 100 nm, 长度约为 110 μ m, 其长径比高达 1 000 以上。另外在 AgNWs 表面旋涂一层 ZnO 得到 AgNWs-ZnO 复合电极如图 3(b) 所示, 可以看出 ZnO 将 AgNWs 包覆并与基底粘附在一起, 另外在 AgNWs 交叉节点处的连接也更加紧密。通过胶带对电极粘附性测试, 结果显示纯 AgNWs 电极在胶带揭开后, AgNWs 有明显的脱落, 如图 3(c) 所示; 而 AgNWs-ZnO 复合电极在胶带揭开后 AgNWs 无明显脱落, 如图 3(d) 所示, 证明这种 AgNWs-ZnO 复合电极具有较好的粘附性。

利用紫外分光光度计与四探针测试仪对银纳米线电极进行了光电性能测试, 如图 4 所示。结果显示 PET 与 AgNWs 在 550 nm 处的透光率分别为 89.2% 和 91.9%, PET/AgNWs 柔性透明

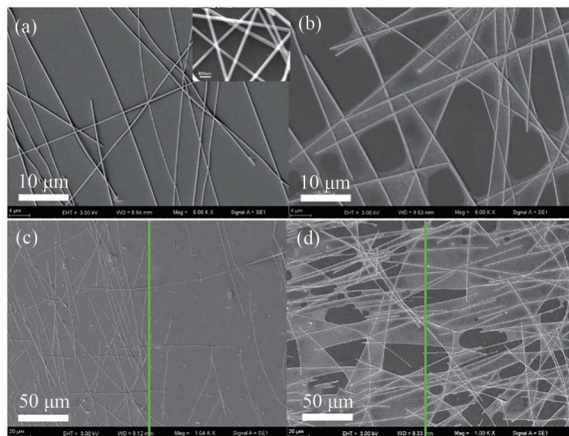


图3 (a) AgNWs的SEM图; (b) AgNWs-ZnO的SEM图; (c)纯AgNWs电极粘附性测试对比的SEM图; (d) AgNWs-ZnO电极粘附性测试对比的SEM图。

Fig. 3 (a) SEM image of AgNWs; (b) SEM image of AgNWs-ZnO; (c) SEM image of pure AgNWs electrode adhesion test comparison; (d) SEM image of AgNWs-ZnO electrode adhesion test comparison.

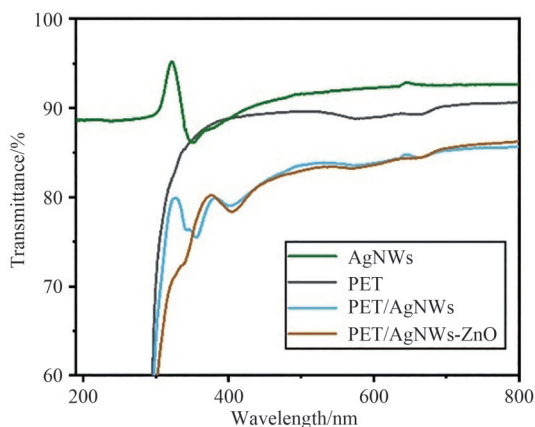


图4 AgNWs柔性透明电极透光率对比

Fig. 4 Comparison of transmittance of AgNWs electrode

电极的透光率为83.8%,表面电阻为 $69.9 \Omega/\square$ 。而通过添加ZnO层得到的PET/AgNWs-ZnO柔性透明电极透光率为83.4%,表面电阻为 $45.8 \Omega/\square$ 。由此可见,在银纳米线表面通过旋涂一层ZnO不仅能提高其与基底的粘附特性,还能优化AgNWs网络结构,保证在透光率没有明显变化情况下降低电极的表面电阻。

3.2 PVA-LiBF₄凝胶电解质分析

传统的EC器件由电极层/电致变色层/电解质层/对电极层4部分组成。而通常使用的基于PVDF、PMMA和PC等作为凝胶电解质层,并利

用AgNWs电极作为对电极层时,凝胶电解质层会使AgNWs从基底脱落从而使器件工作失效。为了解决这一问题,我们通过在PVA水溶液中掺入LiBF₄并通过循环冷冻形成的水凝胶电解质充当电解质层/对电极层,从而省去对电极层获得更为简单的结构,避免了AgNWs作为对电极层脱落导致失效的问题,并且使得简化结构的EC器件整体具有更高的透光率。PVA-LiBF₄凝胶电解质点亮二极管如图5所示,证明其具有一定导电性,具有替代电极的可行性。



图5 PVA-LiBF₄凝胶电解质点亮二极管

Fig. 5 PVA-LiBF₄ gel electrolyte lighting diode

为了测量PVA-LiBF₄凝胶电解质离子导电率,采用电化学工作站交流阻抗法进行测试。将面积 A 为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ cm}$ 、高度 H 为 0.25 cm 的PVA-LiBF₄凝胶电解质夹在两块大小相同的电极中间,测定频率为 $1 \sim 100 \text{ kHz}$,恒压 5 mV 扫描。测量示意图如图6(a)所示。根据电解质离子电导率计算公式进行计算: $\sigma = H/R_b A$ 。其中 H 为凝胶电解质高度, A 为电极与凝胶电解质有效接触面积, R_b 为凝胶电解质本体电阻(交流阻抗谱曲线与 X 轴截距值)。最终测出PVA-LiBF₄凝胶电解质的交流阻抗谱如图6(b)所示,PVA-LiBF₄凝胶电解质本体电阻 R_b (交流阻抗曲线与 X 轴截距值)为 2.6Ω ,并由计算公式可得PVA-LiBF₄凝胶电解质的离子电导率为 $1.53 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$,与相关文献中报道的凝胶电解质离子电导率进行了对比,如表1所示。可以看出PVA-LiBF₄凝胶电解质具有较高的离子电导率,进一步证明了PVA-LiBF₄凝胶电解质替代电极的可行性。

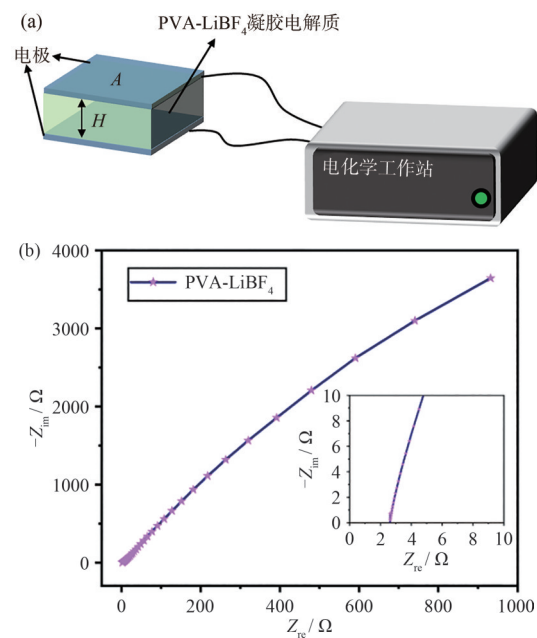


图 6 (a)电化学工作站测试凝胶电解质离子电导率示意图; (b)凝胶电解质交流阻抗曲线图。

Fig. 6 (a)Electrochemical test station for conductivity measurements of gel electrolyte ions; (b)AC impedance curve of gel electrolyte.

表 1 文献中离子凝胶电解质离子电导率

Tab.1 Ionic conductivity of gel electrolytes from the literature

Electrolyte	Ionic conductivity/ (S·cm ⁻¹)
PVA/LiBF ₄ (this work)	1.53×10 ⁻²
PMMA/LiClO ₄ /[Emim]BF ₄ ^[25]	2.9×10 ⁻³
PVDF-HFP/LiCF ₃ SO ₃ /ZrO ₂ ^[26]	1.78×10 ⁻³
PMMA/LiClO ₄ /hydrophobic SiO ₂ ^[27]	5.14×10 ⁻³
M-SG11K/LiPF ₆ ^[28]	1.36×10 ⁻³

3.3 EC 器件性能分析

通过在 PET/AgNWs-ZnO 柔性透明电极表面分别旋涂两种电致变色材料 P3HT 和 PEDOT:PSS,再利用 PVA-LiBF₄凝胶电解质贴附封装,最终得到大小为 3 cm×3 cm 的两种不同 EC 器件。基于 P3HT 的 EC 器件初始状态为紫红色(着色状态)如图 7(a)所示,通过在 EC 器件的电致变色层一侧接入 1.5 V 正向电压,P3HT 的 EC 器件迅速褪色成淡蓝色如图 7(b)所示,变淡蓝色后再反接电源又会迅速变成紫红色。基于 PEDOT:PSS 的 EC 器件初始状态为浅蓝色(褪色

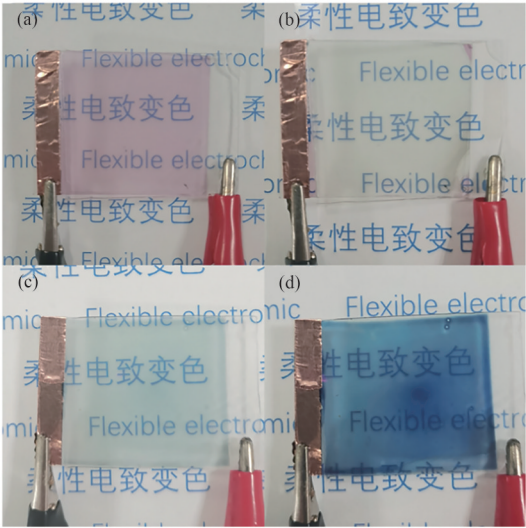


图 7 P3HT EC 器件的(a)着色状态,(b)褪色状态; PEDOT:PSS EC 器件的(c)褪色状态,(d)着色状态。

Fig. 7 P3HT EC device of (a) coloring, (b) fading; PEDOT:PSS EC device of (c) fading, (d) coloring.

状态)如图 7(c)所示,通过在 EC 器件的电致变色层一侧接入 1.5 V 负向电压,PEDOT:PSS 的 EC 器件迅速着色成深蓝色如图 7(d)所示,变深蓝色后再反接电源又会迅速变成浅蓝色。

为了对比 PEDOT:PSS 和 P3HT 两种 EC 器件着色与褪色的两种状态下的光调制范围,我们通过紫外分光光度计分别对 EC 器件着色与褪色进行透光率测试,测试范围为 300~800 nm。图 8 所示为 P3HT EC 器件着色与褪色的透光率对比。图中可以看出,在 560 nm 处 P3HT EC 器件有最大光调制范围,此处 P3HT EC 器件着色状

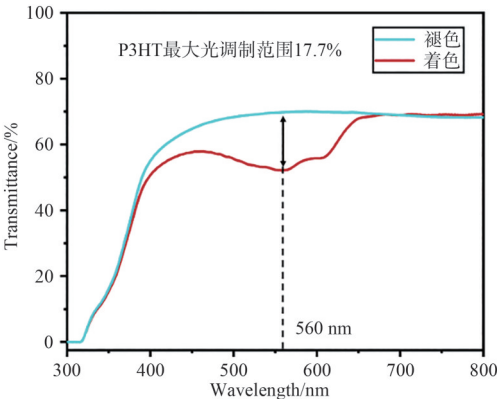


图 8 P3HT EC 器件着色与褪色光谱图

Fig. 8 Coloring and fading spectra of P3HT EC device

态透光率为52.1%,褪色状态透光率为69.8%,最大光调制范围为17.7%。

PEDOT:PSS EC器件着色与褪色的透光率对比如图9所示。图中可以看出,在660 nm处PEDOT:PSS EC器件有最大光调制范围,此处PEDOT:PSS EC器件着色状态透光率为25.8%,褪色状态透光率为63.6%,最大光调制范围为37.8%。由此可以看出PEDOT:PSS EC器件具有较好的最大光调制范围,并且比P3HT EC器件高20.1%,足足高出两倍有余。并且P3HT EC器件着色与褪色仅在400~650 nm波长范围内有透光率变化,在其他波长范围几乎没有透光率变化,而PEDOT:PSS EC器件在400~800 nm以及近红外区域都有较大的透光率变化。

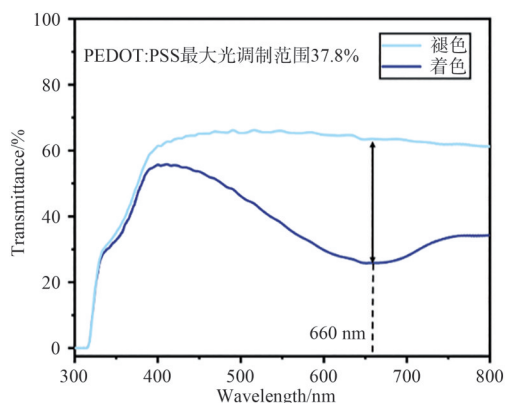


图9 PEDOT:PSS EC器件着色与褪色光谱图

Fig. 9 Coloring and fading spectra of PEDOT:PSS EC device

通过图10对比PEDOT:PSS/P3HT两种EC器件的着色与褪色速率,可以看出PEDOT:PSS EC器件着色与褪色时间分别为3.5 s和3.8 s,P3HT EC器件着色与褪色时间分别为3.2 s和3.1 s,两者差距不大。通过图11自组装弯曲测试仪对两种EC器件进行机械柔性测试,弯曲曲率为5 mm,弯曲频率为2 s,测试EC器件弯曲循环100次后的光调制范围(ΔT)的变化,结果显示PEDOT:PSS/P3HT两种EC器件弯曲100次后光调制范围仅下降1.8%和1.0%,都具有较好的机械柔性。另外PEDOT:PSS具有较高的粘度值,可以大面积涂布,且价格远低于P3HT,故而电致变色材料PEDOT:PSS相对

于P3HT在柔性EC器件方面有更好的应用前景。

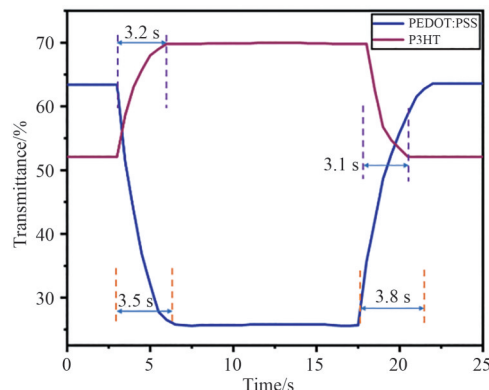


图10 PEDOT:PSS/P3HT EC器件着色与褪色速率对比

Fig. 10 Coloring and fading rates of PEDOT:PSS/P3HT EC devices

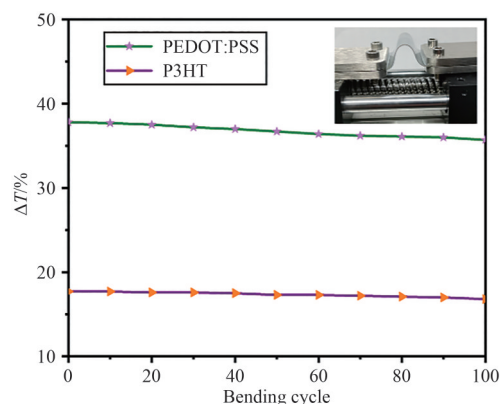


图11 PEDOT:PSS/P3HT EC器件柔性弯曲测试

Fig. 11 Flexible bending test of PEDOT:PSS/P3HT EC devices

3.4 图案化EC器件

由于电致变色材料PEDOT:PSS油墨较为稳定不易挥发且具有一定粘度,因此可以通过刮涂、丝网印刷等方式进行大面积涂布。为了使PEDOT:PSS EC器件具有更好的显示效果,我们利用中国传统毛笔书写的方式将PEDOT:PSS油墨书写在AgNWs柔性透明电极表面,其书写示意图如图12所示。

最后将PVA-LiBF₄凝胶电解质贴附封装在图案化PEDOT:PSS表面形成完整的有“江南”图案的EC器件,并接入1.5 V电源工作。图13(a)、13(b)分别为图案化PEDOT:PSS EC器件的褪色与着色显示,图13(c)为图案化PEDOT:

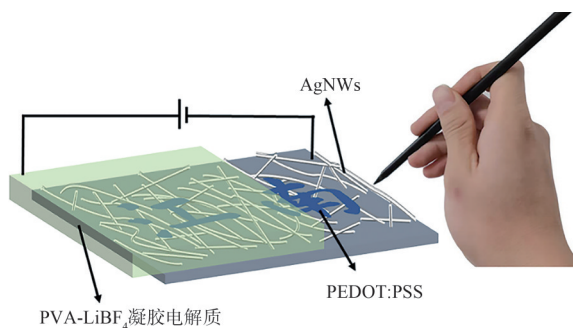


图 12 毛笔书写图案化 PEDOT:PSS EC 器件示意图

Fig. 12 Schematic diagram of brush writing patterned PEDOT:PSS EC device

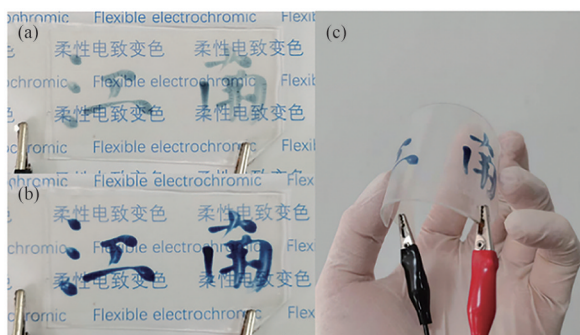


图 13 图案化 PEDOT:PSS EC 器件褪色(a)、着色(b)和弯曲显示(c)。

Fig. 13 Fading (a), coloring (b) and bending display (c) of patterned PEDOT:PSS EC device.

PSS EC 器件在弯曲状态下的显示效果,可以看出具有较好的机械柔性和个性化显示特性。

另外通过丝网印刷的方式将 PEDOT:PSS 油墨涂布在 AgNWs 柔性透明电极表面,得到有“江南大学”logo 的图案化 EC 器件,并且具有一定的贴附性,如图 14 所示。



图 14 丝网印刷的图案化 PEDOT:PSS EC 器件贴附展示

Fig. 14 Screen printing patterned PEDOT:PSS EC device attachment display

4 结 论

采用多元醇法合成出长径比约为 1 000 的银纳米线,并通过 ZnO 涂层获得相互连接更好的 AgNWs 网格,在不改变透光率前提下使得表面电阻由 $69.9 \Omega/\square$ 减小为 $45.8 \Omega/\square$,以及提高银纳米线与柔性基底的粘附性,从而得到具有较好机械柔性、粘附性和光电性能的 PET/AgNWs-ZnO 柔性透明电极。并用离子导电率为 $1.53 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ 的 PVA-LiBF₄ 凝胶电解质充当电极简化 EC 器件结构,使得 EC 器件整体具有更高的透光率。对比 PEDOT:PSS 与 P3HT 两种电致变色材料,发现 PEDOT:PSS EC 器件具有 37.8% 最大光调制范围,远高于 P3HT EC 器件 17.7% 的最大光调制范围。最后利用毛笔书写和丝网印刷的方式制备出具有个性化图案的 PEDOT:PSS EC 器件。

参 考 文 献:

- [1] LU N S, LU C, YANG S X, *et al.* Highly sensitive skin-mountable strain gauges based entirely on elastomers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(19): 4044-4050.
 - [2] LEE S J, KIM Y H, KIM J K, *et al.* A roll-to-roll welding process for planarized silver nanowire electrodes [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(20): 11828-11834.
 - [3] ZHOU Y L, ZHAO C S, WANG J C, *et al.* Stretchable high-permittivity nanocomposites for epidermal alternating-current electroluminescent displays [J]. *ACS Materials Letters*, 2019, 1(5): 511-518.
 - [4] 张宏科,孙军,杨丹丹,等. 基于 13,13-二甲基 N,N'-二-对甲苯基-13H-茚并[1,2-B]蒽-2-胺高效长寿命蓝光有机电致发光二极管[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(12): 1136-1142.
- ZHANG H K, SUN J, YANG D D, *et al.* High-efficiency long-life blue organic electro-luminescent diode based on 13, 13-dimethyl-N, N'-di-p-tolyl-13 H-indeno[1, 2-b] anthracen-2-amine [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals*

- and Displays*, 2019, 34(12): 1136-1142. (in Chinese)
- [5] XIONG S X, HU L, HU L, *et al.* 12.5% flexible nonfullerene solar cells by passivating the chemical interaction between the active layer and polymer interfacial layer [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(22): 1806616.
- [6] 孙天皓,刘红均,伏桂月,等. WO₃薄膜电致变色器件的响应时间测试及其改善方案[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(5): 641-648.
- SUN T H, LIU H J, FU G Y, *et al.* Measuring and improving response time of WO₃ thin film electrochromic devices [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(5): 641-648. (in Chinese)
- [7] FANG H J, ZHENG P Y, MA R, *et al.* Multifunctional hydrogel enables extremely simplified electrochromic devices for smart windows and ionic writing boards [J]. *Materials Horizons*, 2018, 5(5): 1000-1007.
- [8] BAE J, KIM H, HONG C M, *et al.* Low-voltage, simple WO₃-based electrochromic devices by directly incorporating an anodic species into the electrolyte [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(46): 10887-10892.
- [9] COSTA C, PINHEIRO C, HENRIQUES I, *et al.* Inkjet printing of sol-gel synthesized hydrated tungsten oxide nanoparticles for flexible electrochromic devices [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(3): 1330-1340.
- [10] CHEN C, ZHAO Y, WEI W, *et al.* Fabrication of silver nanowire transparent conductive films with an ultra-low haze and ultra-high uniformity and their application in transparent electronics [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(9): 2240-2246.
- [11] KIM Y, RYU T I, OK K H, *et al.* Inverted layer-by-layer fabrication of an ultraflexible and transparent Ag nanowire/conductive polymer composite electrode for use in high-performance organic solar cells [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(29): 4580-4589.
- [12] LIN Y H, FIRDAUS Y, ISIKGOR F H, *et al.* Self-assembled monolayer enables hole transport layer-free organic solar cells with 18% efficiency and improved operational stability [J]. *ACS Energy Letters*, 2020, 5(9): 2935-2944.
- [13] TIAN Y, WANG T, ZHU Q X, *et al.* High-performance transparent PEDOT: PSS/CNT films for OLEDs [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(8): 2067.
- [14] KRANTZ J, RICHTER M, SPALLEK S, *et al.* Solution-processed metallic nanowire electrodes as indium tin oxide replacement for thin-film solar cells [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(24): 4784-4787.
- [15] MOHL M, DOMBOVARI A, VAJTAI R, *et al.* Self-assembled large scale metal alloy grid patterns as flexible transparent conductive layers [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13710.
- [16] ZHANG W X, SONG W, HUANG J M, *et al.* Graphene: silver nanowire composite transparent electrode based flexible organic solar cells with 13.4% efficiency [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(38): 22021-22028.
- [17] LEE S, JANG J, PARK T, *et al.* Electrodeposited silver nanowire transparent conducting electrodes for thin-film solar cells [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(5): 6169-6175.
- [18] STEWART I E, KIM M J, WILEY B J. Effect of morphology on the electrical resistivity of silver nanostructure films [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(2): 1870-1876.
- [19] BOK S, AHN K, OH H, *et al.* Solution-processable transparent organic molecular nanoadhesives for exceptionally durable nanowire electrodes [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2020, 6(6): 1901440.
- [20] KO Y, SONG S K, KIM N H, *et al.* Highly transparent and stretchable conductors based on a directional arrangement of silver nanowires by a microliter-scale solution process [J]. *Langmuir*, 2016, 32(1): 366-373.
- [21] DONG X Y, SHI P, SUN L L, *et al.* Flexible nonfullerene organic solar cells based on embedded silver nanowires with an efficiency up to 11.6% [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(5): 1989-1995.
- [22] LEE J, PARK J. Planarization of slot-die coated multilayer stripes via pre-drying by a heating roll for organic light-emitting diodes [J]. *Thin Solid Films*, 2020, 693: 137672.
- [23] JO W, KANG H S, CHOI J, *et al.* Plasticized polymer interlayer for low-temperature fabrication of a high-quality silver nanowire-based flexible transparent and conductive film [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(17): 15114-15121.
- [24] STAUFFER S R, PEPPAST N A. Poly (vinyl alcohol) hydrogels prepared by freezing-thawing cyclic processing [J]. *Polymer*, 1992, 33(18): 3932-3936.
- [25] TANG Q F, LI H Z, YUE Y F, *et al.* 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate-doped high ionic conductivity

- ty gel electrolytes with reduced anodic reaction potentials for electrochromic devices [J]. *Materials & Design*, 2017, 118: 279-285.
- [26] PUGUAN J M C, CHINNAPPAN A, APPIAH-NTIAMOAH R, *et al.* Enhanced ionic conductivity and optical transmissivity of functionalized $\text{ZrO}_2/\text{PVdF-HFP}$ hybrid electrolyte for energy efficient windows [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 137: 265-273.
- [27] ZHAO Q, QIAO K, YAO Y J, *et al.* High-conductivity hydrophobic fumed- SiO_2 composite gel electrolyte for high performance electrochromic devices [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2021, 36(2): 161-167.
- [28] 冯昌浩,高允琪,张旭,等. 硅烷改性交联聚醚凝胶电解质的制备及性能研究[J]. *功能材料*, 2021, 52(9): 9078-9082.
- FENG C H, GAO Y Q, ZHANG X, *et al.* Preparation and performance investigation of crosslinked polyether gel electrolyte modified by silane [J]. *Journal of Functional Materials*, 2021, 52(9): 9078-9082. (in Chinese)

作者简介:



邸永跃(1996—),男,安徽滁州人,硕士研究生,2019年于安徽工业大学获得学士学位,主要从事银纳米线柔性透明电极应用的研究。E-mail: 6190805032@stu.jiangnan.edu.cn



张 婕(1962—),女,四川成都人,博士,教授,1995年于伊利诺伊大学芝加哥分校获得博士学位,主要从事微纳制造工程技术、多维度功能性微纳材料系统的研究。E-mail: jiezhang@jiangnan.edu.cn