

文章编号:1007-2780(2018)11-0918-06

纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜的制备及其在柔性触控上的应用

许钰旺, 龚又又, 王 力, 刘贵师, 杨柏儒*

(中山大学 电子与信息工程学院, 广东省显示材料与技术重点实验室,
光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 纳米银线透明导电薄膜具有优异的光电性能和机械性能, 有望取代传统的氧化铟锡材料应用于柔性光电器件中。为解决纳米银线的黏附性、柔韧性和稳定性问题, 结合转印法和烷基硫醇修饰法制备了纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜。在此过程中, 首先应用十八烷基三氯硅烷对转移衬底进行疏水化处理以提升透明电极转印的良率; 接着, 对转印后的纳米银线进行烷基硫醇分子的自组装修饰, 以进一步提升纳米银线透明导电薄膜的稳定性; 最后在此基础上制备了柔性投射式电容触控屏。所制备的透明导电薄膜具有优异的综合性能: 品质因数约为 300 ($R_s = 29.7 \Omega/\square$, $T = 96.2\%$); 薄膜经过 100 次胶带测试后, 电阻变化小于 25%; 在 1 000 次弯曲(弯曲半径为 1 mm)测试后, 电阻几乎不发生变化; 高温高湿下老化一个月, 电阻变化小于 20%。本文结合转印工艺以及分子修饰技术开发的纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜以及柔性触控工艺, 有望推广应用至其他柔性电子元件中。

关键词: 纳米银线, 转印工艺, 稳定性, 柔性触控

中图分类号: O59 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183311.0918

Fabrication of AgNWs-epoxy composite film and its application in flexible touch panel

XU Yu-wang, GONG You-you, WANG Li, LIU Gui-shi, YANG Bo-ru*

(Guang Dong Province Key Laboratory of Display Materials and Technology,
State Key laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies,
School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University,
Guangzhou 510006, China)

Abstract: Silver nanowires (AgNWs) are regarded as one of the promising alternatives to traditional indium tin oxide as transparent conductive materials because of its outstanding opto-electronic and mechanical performances. In order to improve the adhesion, flexibility and stability of AgNWs films, we proposed a facile transferring and alkanethiolate based self-assembled process to fabricate the AgNWs-epoxy resin (EPR) composite film. Firstly, surface energy of the temporary substrate was modified by

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-08-21.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2015AA033408); 国家自然科学基金(No. 61307027)

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2015AA033408); National Natural Science Foundation of China (No. 61307027)

* 通信联系人, E-mail: paulyang68@me.com

trichloro(octadecyl)silane to facilitate the delamination from EPR. Then the AgNWs-EPR composite film was further decorated by methyl-terminated alkanethiolate for better stability. Finally, a flexible projective capacitive touch panel enabling multi-touch was fabricated by this composite film. The AgNWs-EPR composite film capped with alkanethiolate monolayers exhibited comprehensive performance including high FoM of 300 ($R_s = 29.7 \Omega/\square$, $T = 96.2\%$), strong adhesion ($R_s/R_0 < 125\%$ for 100 tape test), ultra-flexibility (sheet resistance remained almost unchanged after 1 000 bending cycles with a bending radius of 1 mm) and strong corrosion resistance ($R_s/R_0 < 120\%$ after an accelerated aging test under 85°C , $85\%\text{RH}$). We believe this transferring and decorating method for forming AgNWs composite film and the relative techniques for demonstrating flexible touch panel can be popularized to various flexible electronic applications.

Key words: silver nanowires; transferring; stability; flexible touch

1 引言

电子器件轻薄化的发展趋势催生了透明导电薄膜的发展,以氧化铟锡(ITO)为代表,透明导电薄膜已被广泛应用于光电器件之中,如触控屏幕^[1](Touch panel, TP)、液晶显示器^[2](Liquid crystal display, LCD)、有机发光二极管显示^[3](Organic light emitting diode, OLED)、电子书阅读器^[4](E-paper)和太阳电池^[5](Solar cell)等。传统的 ITO 透明导电薄膜具备良好的透光性和导电性,尽管如此,作为金属氧化物,ITO 柔韧性较差,难以应用于新一代柔性电子元件之中。纳米银线透明导电薄膜由于具备良好的导电性、透光性和弯曲特性,且能够兼容溶液态卷对卷制程,被认为是 ITO 的理想取代物之一^[6-7]。

尽管溶液态制程使纳米银线透明导电薄膜能够被低成本、批量化的生产,事实上也将同时伴随如下问题:(1)纳米银线之间的高接触电阻^[8];(2)与基底黏附力较差^[9];(3)稳定性不高^[10]。现有的解决方法包含机械加压^[11]、热压^[12]、与导电基质复合(PEDOT^[13]、碳纳米管^[14]、石墨烯^[15])等,并不能同时解决接触电阻、黏附性与稳定性的问题;藉由真空制程(蒸镀^[16]、原子沉积^[17]等)在纳米银线上形成金属氧化物保护层能够制备高质量的纳米银线透明导电薄膜,然而此种制程的成本高昂。

本文通过转印法将纳米银线部分嵌入至环氧树脂固化胶内部,能够同时克服上述问题。固化胶可以填充纳米银线之间的空隙,以降低粗糙度,同时贴紧纳米银线以增强黏附力;半嵌

入的结构也可以减少纳米银线裸露的面积,提高了它们的化学稳定性。由于环氧树脂固化胶对玻璃衬底具有极强的粘接性,在转印的过程中,如何实现固化胶与玻璃衬底的剥离并有效地将纳米银线从玻璃衬底转印至固化胶薄膜,为本文研究的关键问题之一。另外,转印后的纳米银线并未完全被固化胶埋入,这一部分裸露在空气中的纳米银线仍然会受到水气、氧气和硫化物的腐蚀,如何对这一部分外露的纳米银线进行保护,以为进一步改善纳米银线的稳定性,为本文研究的关键问题之二。

在本文研究过程中,我们藉由十八烷基三氯硅烷对玻璃衬底进行疏水化处理,以降低其与环氧树脂的粘附功,实现了纳米银线的有效转印,所制备的纳米银-环氧树脂固化胶复合导电薄膜品质因数达到 300 左右($R_s = 29.7 \Omega/\square$, $T = 96.2\%$),优于现有报告的制程方案^[18-21]。经过 100 次胶带(3M tape)测试后,电阻变化小于 25%,在 1 000 次弯曲测试(弯曲半径 1 mm)后,电阻几乎不发生变化,表明本研究制备的透明导电薄膜兼具良好的光电特性与机械特性。为进一步提升纳米银线复合导电薄膜的稳定性,利用巯基在银金属表面的吸附能力,我们通过十八烷基硫醇溶液对裸露的纳米银线进行修饰,1 个月高温高湿稳定性测试结果表明,修饰后的纳米银线-固化胶透明导电薄膜具有极高的稳定性(电阻变化小于 20%)。最后,基于本研究的高稳定性纳米银线-固化胶复合导电薄膜,我们成功制备了柔性投射式电容触控屏(FF 结构),验证了本文制备的纳米银线复合导电薄膜在新一代柔性电子元件中的应用前景。

2 实验方法

2.1 纳米银线油墨的配置

本研究采用的纳米银线 ($D = 43.5 \text{ nm}$, $L = 21.2 \mu\text{m}$) 购置于浙江科创科技公司, 溶剂为乙醇。我们使用配置了一系列不同浓度的纳米银线 ($0.1\% \sim 0.75\%$ 质量分数) 油墨, 同时加入少量表面活性剂 Triton x-100 (0.0125% 质量分数, Sigma-Aldrich) 以减少纳米银线的团聚。

2.2 十八烷基三氯硅烷、正十八烷基硫醇溶液配置

十八烷基三氯硅烷 (Trichloro(octadecyl) silane, OTS) 购买自 Sigma-Aldrich 公司, 以 0.2% 的浓度溶解于正己烷试剂中备用;

正十八烷基硫醇 (Octadecanethiol, ODT) 购买至 Aladdin 公司, 以 50 mmol/L 的浓度溶解于乙醇中, 并于磁力搅拌仪上搅拌 3 h 备用。

2.3 纳米银线-环氧树脂固化胶复合导电薄膜的制备

纳米银线-环氧树脂 (Epoxy resin, EPR) 复合导电薄膜的制备流程如图 1 所示, 主要包含以下 3 个步骤: (1) 在 UVO 处理的玻璃表面旋涂沉积纳米银线; (2) 将上述样品浸泡于 OTS 溶液中, 以在沉积有纳米银线的表面引入抗粘附官能团; (3) 将纳米银线嵌入环氧树脂固化胶中, 经由紫外固

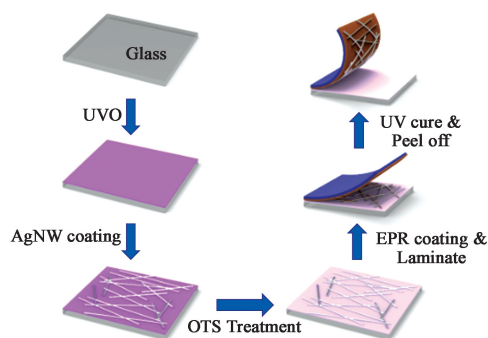


图 1 纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜制程, 包括玻璃 UVO 处理、纳米银线涂布、OTS 修饰、EPR 涂布、固化和剥离。

Fig.1 Schematic of transferring process for AgNWs-EPR composite conductive film, including UVO treatment to glass, AgNWs coating, OTS decoration, EPR coating & laminating and UV curing followed by peeled off.

化后剥离形成复合导电薄膜。其中 OTS 的修饰时间小于 15 s , 修饰完成后, 薄膜被置于干净的正己烷中清洗, 以去除残留的 OTS 分子, 并置于热板上烘干; 环氧树脂固化胶 (DELOKATIOBOND AD VE 110543) 预先通过刮涂的方式涂布于 PET 基底上, 与经过表面修饰的玻璃/纳米银薄膜贴合后暴露于紫外光下 (15 mW/cm^2 , 5 min) 完成固化, 剥离后形成纳米银线-环氧树脂固化胶复合导电薄膜 (图 2)。

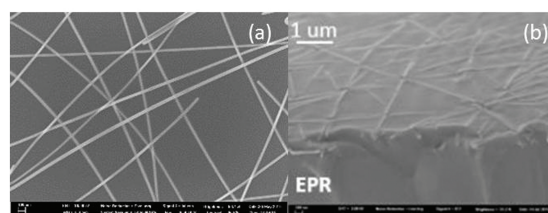


图 2 转印前后纳米银线薄 SEM 形貌。(a) 玻璃-纳米银线导电薄膜; (b) 环氧树脂-纳米银线复合导电薄膜。

Fig.2 SEM image of AgNWs before (a) and after (b) transferring process

2.4 纳米银线-环氧树脂固化胶复合导电薄膜的稳定性修饰

当上述的纳米银线复合导电薄膜制备完成后, 将其浸泡于预先配置好的 ODT 溶液中, 浸泡时间为 30 min , 以对纳米银线裸露的部分进行表面修饰。

2.5 表征手段

导电薄膜的方块电阻、透光率分别采用四探针方阻仪 (Mitsubishi, MCP-T370)、紫外可见分光光度计 (Evolution 220) 进行测试; 黏附测试采用 3M 胶带; 弯曲测试过程由计算机可编程的二维移动电动平台 (Zolix SC300-3A) 实现, 电阻变化由 Keithley 2400 数字源表测量; 稳定性测试在 85°C , $85\% \text{ RH}$ 下进行 (高温高湿测试机, Yashilin GDJS-225); 衬底的接触角以及表面能由接触角分析仪 (Dataphysics OCA 15EC) 测量计算得到, 其中表面能的极性和非极性部分分别采用水和二碘甲烷获得, 接触角分析仪软件表面能计算采用 Owens-Wendt-Rabel-Kaelble 模型^[22]; 纳米银线的表面形貌由扫描电子显微镜 (Carl Zeiss SUPRA 60) 测量得到。

3 结果与讨论

3.1 OTS 表面修饰对导电薄膜转印效果的改善

纳米银线能否有效地从玻璃衬底转印至固化胶内部与被转印衬底(玻璃)的表面能大小直接相关。经过 UVO 处理的玻璃表面将产生大量的极性—OH 基团,为极度亲水表面(接触角小于 5° , 图 3)。根据 Yang-Dupre 方程^[23](式(1))对粘附功的描述,此时的玻璃基底将表现出极大的粘附力,将使环氧树脂固化胶难以从亲水的玻璃表面剥离。也就是说,在转印之前,需要预先对玻璃基底进行疏水化处理,以实现成功的转印制程。从另一个角度来看,由于纳米银线以导电网络的方式分布于玻璃衬底上,实际上大部分的区域为直接暴露的玻璃基底,而 OTS 的疏水化修饰,即是通过与玻璃衬底上此一部分外露的羟基基团反应接枝^[24](图 4),将极性的羟基替换为非极性的甲基,以转换为疏水的表面(OTS 修饰后接触角为 106° ,图 3)。

$$W_{LS} = \gamma_L (1 + \cos\theta), \quad (1)$$

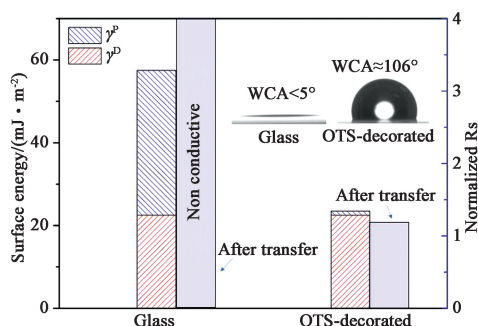


图 3 OTS 修饰前后衬底的表面能、接触角以及转印后的纳米银薄膜方阻变化(归一化)对比,其中 γ^p 为表面能的极性部分, γ^d 为表面能的非极性部分。

Fig.3 Comparison of surface energy, water contact angle and R_s change (normalized) of AgNWs composite film for pure UVO glass and OTS treated glass. γ^p and γ^d is the polar and dispersive component of the surface energy respectively.

从图 3 OTS 修饰前后的玻璃基底表面能计算结果来看,表面能的极性部分 γ^p 大幅度减小,表明玻璃表面的极性羟基基团已被 OTS 的非极

性甲基基团替换。对比图 3 给出的结果,从未进行 OTS 疏水处理的玻璃表面转印纳米银线,其方块电阻将无穷大;而对于修饰后的玻璃衬底,其转印效率大大提升,转印后方阻仅增加 20%。

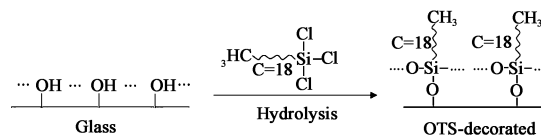


图 4 OTS 与亲水玻璃基底表面羟基反应过程示意图

Fig.4 Schematic of the OTS hydrolysis process with —OH groups on the surface of hydrophilic glass.

3.2 纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜的性能表征

品质因数^[25](Figure of merit, FoM)常用于评估透明导电薄膜的光电性能优劣,透光率与导电性一般呈现相互制约关系,这个关系用品质因数公式表达如下:

$$K_{FoM} = \frac{Z_0}{2R_s(T^{-\frac{1}{2}} - 1)}, \quad (2)$$

其中 Z_0 为自由空间阻抗,其值为 377Ω ^[25],从公式可以看出当导电薄膜的方阻越低,而透光率越高时,将具有更大的品质因数。由于疏水化表面修饰提高了转印的效率,减少了转印过程纳米银线的脱落,所制得的纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜,其品质因数可达到 300 以上($R_s = 29.7 \Omega/\square$, $T = 96.2\%$)。此结果与文献报道^[18-21]的导电薄膜光电性能相当甚至更优(图 5(a))。除此之外,由于纳米银线以半嵌入的方式形成与环氧树脂复合的导电薄膜结构,环氧树脂对纳米银线的强粘接能力使所制得的纳米银线复合导电薄膜具有极强的抗粘附能力,在经过 100 次的粘附力测试后(3M 胶带),电阻的变化小于 23%(图 5(b));除此之外,机械性能的改善还体现在优异的柔韧性:弯曲半径 1 mm 下重复弯曲 3 000 次,薄膜电阻几乎不发生变化(图 5(c)),柔韧性上的提升得益于薄的环氧树脂厚度和环氧树脂基底对纳米银线的强粘接力。

3.3 纳米银线复合导电薄膜的稳定性提升及测试

在透明导电薄膜的实际应用中,纳米银线的稳定性是一个必须解决的问题,环境中的水氧、硫

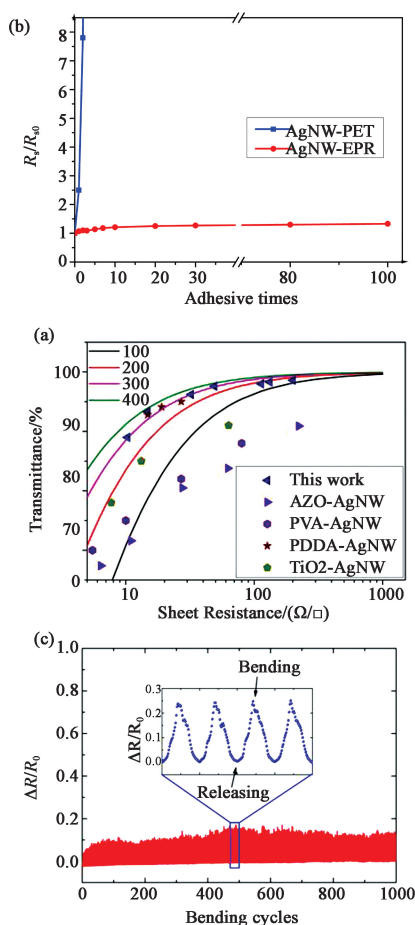


图 5 纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜的光电、机械性能测试,包括品质因数(a)、黏附力(b)和柔韧性测试(c)。

Fig.5 Opto-electronic and mechanical performance of AgNWs-EPR composite electrode, including FoM (a), adhesion (b), and bending test (c).

化物等均可以显著的降低纳米银线的导电性^[10]。一些研究采取物理阻隔层的方式(如埋入聚乙烯醇^[19]、或者用氧化石墨烯^[15]覆盖纳米银线)来提升纳米银线的稳定性,但是这样会或多或少地降低牺牲纳米银线的光电性能。在本文的研究中,我们通过浸涂的方式在纳米银线表面沉积正十八烷基硫醇作为保护层。正十八烷基硫醇能够通过 Ag-S 键^[26]吸附在纳米银线表面形成单分子层,将纳米银线与外界的腐蚀物阻隔起来。这种方法的优势不仅在于方便的溶液态制程,还在于单分子层的修饰方案不会劣化纳米银线的光电性能(图 6)。

我们采用高温高湿加速老化的手段对 ODT

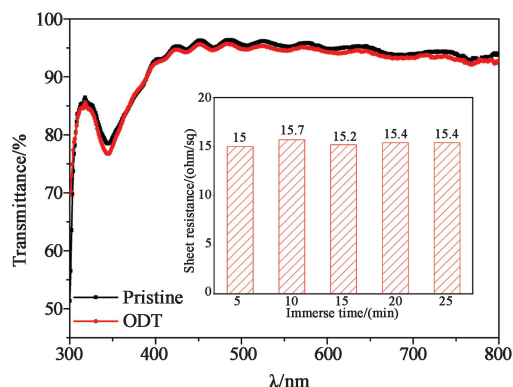


图 6 ODT 修饰前后纳米银线的透光率和方块电阻变化

Fig.6 Transmittance and sheet resistance change of AgNWs film before and after ODT immersing

修饰前后的纳米银线进行了稳定性测试(85 °C, 85%RH, 30 d)。如图 7 所示显示了 1 个月的测试后纳米银线的形貌演化:未经过修饰的纳米银线,纳米银线发生迁移、缩聚的现象,用以形成导电通道的网络遭到破坏,仅仅 10 d 过后,导电性便恶化了 10 倍以上,老化一个月后则变得不导电;对于转印后的纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜,尽管纳米银线有更小的暴露面积,老化一个月后导电性仍然会发生劣化,为初始电阻的 2 倍左右;对于 ODT 修饰的纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜,由于 ODT 中烷基长链的疏水性单分子保护层对腐蚀物的阻挡,其方块电阻在高温高湿老化一个月后仅变为初始方阻的 118%。以上结果表明了基于 ODT 的溶液态修饰方案在纳米银线稳定性提升上的高效性,为纳米银线的稳定性

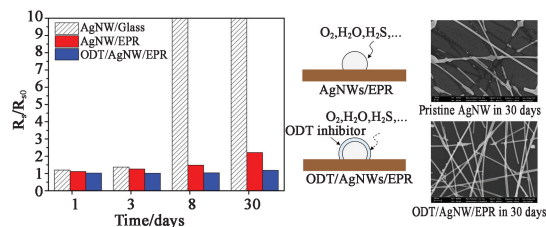


图 7 纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜的老化测试,包含电阻变化、ODT 保护机理示意图以及纳米银线的形貌演变。

Fig. 7 Stability test of AgNWs-EPR composite electrode, including R_s change, morphology change and the schematic of ODT protection mechanism.

提升提供了一条新颖的技术路线。

3.4 柔性投射式电容屏制备

为了验证本研究提出的转印式纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜的实用性,我们以此复合导电薄膜制备了柔性投射式电容触控屏。由于具有良好的导电性和机械特性,触控屏图案采用 FF (Film-Film) 结构构建,由于此种结构下触控的感应电极和驱动电极能够形成于单层的导电薄膜上,触控薄膜能够做的很薄,集成于显示模组时将有利于提升元件整体的柔韧性。大面积的纳米银薄膜($7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$)能够被有效的转移至环氧树脂固化胶,触控屏幕的面内通道走线和边缘 PIN 线

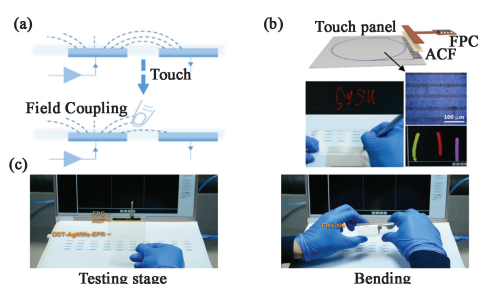


图 8 柔性投射式电容触控屏幕的原理、版图、结构及触控演示。

Fig. 8 Schematic of sensing principle, sensing pattern, touch structure and testing for flexible projective capacitive touch panel.

都由激光刻蚀机刻蚀定义,而触控的信号则是通过各向异性导电胶(ACF)与柔性印刷电路(FPC)导出至触控 IC 上,将触控 IC 连接电脑端测试软件,将实时读取出触控屏幕的触点位置(图 8)。所制备的柔性触控屏幕支持弯曲状态下的多点触控,将有望集成至柔性显示模组,应用在柔性显示终端设备上。

4 结 论

本文结合转印法和烷基硫醇修饰制备了综合性能(光电性能、机械性能、稳定性)优异的纳米银线-环氧树脂复合导电薄膜:品质因数达 300 左右($R_s = 29.7\ \Omega/\square$, $T = 96.2\%$),经过 100 次胶带(3M tape)测试后,电阻变化小于 25%,在 1 000 次弯曲(弯曲半径 1 mm)测试后,电阻几乎不发生变化,高温高湿下老化一个月,电阻变化小于 20%。基于以上制备的复合导电薄膜,我们制备了柔性投射式电容触控屏,该触控屏支持弯曲下的多点触控,验证了本研究制得的导电薄膜在光电器件上的实用性。本文开发的转印工艺以及稳定性提升方案皆为低成本的溶液态制程,结合开发的柔性触控技术,有望推广应用至其他柔性电子元件中。

参 考 文 献:

- [1] HAN B, PEI K, HUANG Y L, *et al.* Uniform self-forming metallic network as a high-performance transparent conductive electrode [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(6): 873-877.
- [2] BRODY T P, ASARS J A, DIXON G D. A 6×6 inch 20 lines-per-inch liquid-crystal display panel [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1973, 20(11): 995-1001.
- [3] 吴晓晓,李福山,吴薇,等.基于石墨烯/PEDOT:PSS 叠层薄膜的柔性 OLED 器件[J].*发光学报*, 2014, 35(4): 486-490.
WU XX, LI F S, WU W, *et al.* Flexible organic light emitting diodes based on double-layered graphene/PEDOT:PSS conductive film [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(4): 486-490. (in Chinese)
- [4] YANG B R, WANG L, WANG Y C, *et al.* Full-color flexible electrophoretic E-paper with interfacial engineering and transferring process [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 542-544.
- [5] 闫敏楠,郑爽,王丹蓓,等.紫外臭氧处理超薄银修饰 ITO 电极的高效柔性有机太阳能电池[J].*发光学报*, 2017, 38(7): 882-890.
YAN M N, ZHENG S, WANG D P, *et al.* High-efficiency flexible organic solar cells with UV-ozone treated silver modification ITO electrode [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(7): 882-890. (in Chinese)
- [6] LAYANI M, KAMYSHNY A, MAGDASSI S. Transparent conductors composed of nanomaterials [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(11): 5581-5591.
- [7] YE S R, RATHMELL A R, CHEN Z F, *et al.* Metal nanowire networks: the next generation of transparent conductors [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(39): 6670-6687.

- [8] SONG T B, CHEN Y, CHUNG C H, *et al.* Nanoscale Joule heating and electromigration enhanced ripening of silver nanowire contacts [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(3): 2804-2811.
- [9] JIN Y X, LI L, CHENG Y R, *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.
- [10] MAYOUSSE C, CELLE C, FRACZKIEWICZ A, *et al.* Stability of silver nanowire based electrodes under environmental and electrical stresses [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(5): 2107-2115.
- [11] GAYNOR W, HOFMANN S, CHRISTOFORO M G, *et al.* Color in the corners: ITO-free white OLEDs with angular color stability [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(29): 4060.
- [12] JING M X, PI Z C, CHEN C Y, *et al.* Scalable fabrication of silver nanowires-polyethylene terephthalate transparent conductive films by rolling-pressing transfer technique at room temperature [J]. *Science of Advanced Materials*, 2015, 7(8): 1599-1604.
- [13] XU Y L, WEI X, WANG C, *et al.* Silver nanowires modified with PEDOT : PSS and graphene for organic light-emitting diodes anode [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45392.
- [14] JING M X, HAN C, LI M, *et al.* High performance of carbon nanotubes/silver nanowires-PET hybrid flexible transparent conductive films via facile pressing-transfer technique [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2014, 9(1): 588.
- [15] 李云飞, 陈洋, 毕宴钢, 等. 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.
LI Y F, CHEN Y, BI Y G, *et al.* Fabrication and characterization of reduced graphene oxide/silver nanowires flexible hybrid electrodes [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(5): 545-551. (in Chinese)
- [16] KIM A, WON Y, WOO K, *et al.* Highly transparent low resistance ZnO/Ag nanowire/ZnO composite electrode for thin film solar cells [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2): 1081-1091.
- [17] PHAM A T, NGUYEN X Q, TRAN D H, *et al.* Enhancement of the electrical properties of silver nanowire transparent conductive electrodes by atomic layer deposition coating with zinc oxide [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(33): 335202.
- [18] XU Q S, SHEN W F, HUANG Q J, *et al.* Flexible transparent conductive films on PET substrates with an AZO/AgNW/AZO sandwich structure [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(19): 3750-3755.
- [19] 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.
- [20] LI Y, CUI P, WANG L Y, *et al.* Highly bendable, conductive, and transparent film by an enhanced adhesion of silver nanowires [J]. *Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(18): 9155-9160.
- [21] SONG T B, RIM Y S, LIU F M, *et al.* Highly robust silver nanowire network for transparent electrode [J]. *Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(44): 24601-24607.
- [22] CHAUDHURY M K. Interfacial interaction between low-energy surfaces [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 1996, 16(3): 97-159.
- [23] PETERSON I R. Towards a theory of adhesion with predictive power [J]. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, 2005, 88(1): 1-8.
- [24] OPILA R L, LEGRANGE J D, MARKHAM J L, *et al.* Effects of surface hydration on the deposition of silane monolayers on silica optical fiber [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1997, 11(1): 1-10.
- [25] DE S, HIGGINS T M, LYONS P E, *et al.* Silver nanowire networks as flexible, transparent, conducting films: extremely high DC to optical conductivity ratios [J]. *ACS Nano*, 2009, 3(7): 1767-1774.
- [26] HIMMELHAUS M, GAUSS I, BUCK M, *et al.* Adsorption of docosanethiol from solution on polycrystalline silver surfaces: an XPS and NEXAFS study [J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 1998, 92(1/3): 139-149.

作者简介: 许钰旺(1994—), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生, 主要从事纳米银线透明导电薄膜、柔性触控方面的研究。

E-mail: xuyw3@mail2.sysu.edu.cn

杨柏儒(1979—), 男, 台湾台北人, 教授, 博士生导师, 主要从事柔性电子、传感技术、柔性显示、电子纸技术的研究。E-mail: paulyang68@me.com