

文章编号: 1000-7032(2015)05-0545-07

## 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

李云飞<sup>1</sup>, 陈 洋<sup>1</sup>, 毕宴钢<sup>1</sup>, 纪一鹏<sup>1</sup>, 曾祥雯<sup>1</sup>, 李 阳<sup>1</sup>,  
程为军<sup>1</sup>, 胡腾飞<sup>1</sup>, 王继萍<sup>2\*</sup>, 杨 海<sup>3</sup>, 李传南<sup>1\*</sup>

(1. 集成光电子学国家重点联合实验室 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 吉林大学 第一附属医院, 吉林 长春 130021; 3. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

**摘要:** 制备了一种具有高导电性、高透过率以及良好的柔性和机械稳定性的还原石墨烯氧化物(RGO)-银纳米线(AgNW)复合电极。将低浓度的AgNW旋涂在制备的RGO薄膜上,使AgNW搭接在RGO的晶界、褶皱处,提高了RGO薄膜的载流子迁移能力。在保证透过率的前提下,提高复合薄膜的导电性能。结合薄膜转写工艺,制备了电阻为420 Ω/□且透过率达62%的RGO-AgNW柔性复合电极。该复合电极具有良好的柔性以及机械稳定性,随着弯折次数的增加,电阻没有明显变化。

**关 键 词:** 石墨烯; 银纳米线; 柔性电极

中图分类号: O59 文献标识码: A DOI: 10.3788/jgxb20153605.0545

### Fabrication and Characterization of Reduced Graphene Oxide/Silver Nanowires Flexible Hybrid Electrodes

LI Yun-fei<sup>1</sup>, CHEN Yang<sup>1</sup>, BI Yan-gang<sup>1</sup>, JI Yi-peng<sup>1</sup>, ZENG Xiang-wen<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>,  
CHENG Wei-jun<sup>1</sup>, HU Teng-fei<sup>1</sup>, WANG Ji-ping<sup>2\*</sup>, YANG Hai<sup>3</sup>, LI Chuan-nan<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. First Clinical Hospital of Jilin University, Changchun 130021, China;

3. Beijing Nonferrous Metal Research Institute, Beijing 100088, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: wangjiping@yahoo.com.cn; licn@jlu.edu.cn

**Abstract:** Flexible electrodes with high conductivity and transparency are still great challenges in the fabrication of stretchable optoelectronic devices. In this experiment, we demonstrated a flexible hybrid electrode based on reduced graphene oxide (RGO) and silver nanowires (AgNW). The RGO was prepared by thermal reduction and hydrazine reduction of graphene oxide to partially remove the oxygen-containing groups and to restore its electrical properties. We employed AgNW to restore the defects in RGO films, such as grain boundaries and wrinkles, to improve the conductivity of the electrodes. By optimizing the processing conditions, the flexible hybrid electrode exhibited excellent optical and electrical characteristics as well as mechanical flexibility. The optical transmittance and sheet resistance of the hybrid electrode were 62% at 550 nm and 420 Ω/□. The RGO/AgNW hybrid electrode shows the potential for a wide range of flexible and stretchable optoelectronic device applications.

**Key words:** RGO; silver nanowire; flexible electrode

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-13

基金项目: 吉林大学研究生创新基金(2014022) 资助项目

## 1 引 言

透明电极作为光电器件中必不可少的组成部分,已成为近年来的研究热点,如其在有机发光二极管<sup>[1-5]</sup>、触摸屏、太阳能电池<sup>[6-10]</sup>等领域的应用研究。而随着易弯曲、可穿戴器件等概念的提出,实现柔性也成为了电极研究工作的重点<sup>[3,11-12]</sup>。在透明电极材料中,最常使用的是铟锡氧化物(ITO),其在可见光波段透过率可以达到90%以上,而电阻仅为10~30 Ω/□。但ITO的制备过程通常都是高温溅射,柔性衬底很难承受,而如果将其低温制备在PET柔性衬底上,其导电性将会大幅度下降,且ITO薄膜在弯折过程中易碎,使得器件在弯折程度上有所限制。因此,寻找新型材料代替传统的ITO材料成为柔性透明导电电极研究的重点。

近年来,取代ITO作为透明电极的材料主要有透明金属氧化物、以PEDOT:PSS为代表的有机聚合物和基于碳纳米管及石墨烯的碳纳米材料<sup>[13-20]</sup>。综合导电性、透光性以及柔性等多个方面衡量,碳纳米材料是最有希望代替ITO的材料。但碳纳米管因为较大的粗糙度而使得其在光电器件中的应用受到制约。石墨烯作为新型的二维碳纳米材料,因具有最薄最轻、最大的载流子迁移率<sup>[21-23]</sup>以及优异的光学性能<sup>[13-14, 24-26]</sup>等优点而备受青睐。制备石墨烯的方法有很多种,包括CVD法生长石墨烯、还原氧化石墨烯、撕胶带剥离法、SiC热分解法等,其中氧化-还原法<sup>[16, 27-31]</sup>因具有操作简单、成本低、易于大量生产且可实现材料的溶液处理而受到广泛关注。但是由于石墨烯自身晶界的存在,以及在制备过程中褶皱、缺陷的产生,使得该方法制备的石墨烯的载流子传输特性受到很大影响,进而影响了后续器件的性能。将金属纳米线与石墨烯相结合制备复合电极是解决这一问题的有效方法,可以显著提高载流子的迁移率。2012年10月,Rodney S. Ruoff教授课题组将银纳米线(AgNW)引入到CVD生长的石墨烯的晶界处,提高了电极的电学性能,并将该电极引入到电致变色器件中<sup>[32]</sup>。2013年1月,该课题组利用还原的石墨烯氧化物(RGO)以及Cu纳米线(CuNW)组成复合电极,提高了电极的导电特性、电极与基底的粘附力以及在恶劣环境下的稳定性,并且将该复合电极引入到基于普鲁士蓝的

器件中,证明该复合电极的性能要好于纯铜纳米线<sup>[33]</sup>。2013年6月,韩国的Youngu Lee教授课题组将石墨烯引入到AgNW电极中,一方面提高其导电性,另一方面保护银纳米线不被空气氧化,从而提高了电极的稳定性<sup>[13]</sup>。

本文通过热还原和肼还原两种方法制备了石墨烯氧化物,并将一定浓度的AgNW旋涂在RGO薄膜上,制备了还原石墨烯-银纳米线(RGO-AgNW)复合电极。利用AgNW搭接在RGO的晶界、褶皱处,在透过率损失很小的条件下有效增强了复合薄膜的导电性能,最终制备了电阻为420 Ω/□、在550 nm处透光率为62%的透明电极。另外,引入NOA63光刻胶进行薄膜转写工艺,将RGO-AgNW电极从表面粗糙度很小的硅衬底上转移到柔性的NOA63衬底上,从而实现了柔性电极的制备。在机械稳定性测试中,随着弯折次数的增加,其电学性能没有明显变化。这一转写方法工艺简单,可以将电极表面粗糙度降至2.12 nm,有效提高了其电学性能,而且平滑表面也为后续的器件制备提供了便利。

## 2 实 验

### 2.1 试剂与仪器

实验中使用的材料主要有银纳米线、石墨、硝酸钠、双氧水(30%)、高锰酸钾、浓硫酸(98%)、水合联氨、丙酮、乙醇、去离子水、硅片、NOA63和PEDOT:PSS等。

实验中使用的仪器主要有集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S)、高速离心机(HC-3514)、数控超声波清洗器(KQ-300DE)、台式匀胶机(KW-4A)、反应釜、电热台(CT-946)、电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9023A)、真空干燥箱(DZF-6020)、场发射扫描电子显微镜(JEOL JSM-6700F)、原子力显微镜(Dimension Icon with Scan Asyst)、扫描探针显微镜(CSPM5000)、四探针方块电阻测试仪(ST-21H)、紫外分光光度计(UV-2550)。

### 2.2 实验过程

实验中所采用的石墨烯氧化物利用修正的Hummer法制得<sup>[16]</sup>。在水浴锅中,将2 g平均尺寸为500~600 μm的天然石墨薄层、2 g硝酸钠以及96 mL浓硫酸(98%)在0℃下混合,用磁子一直搅拌,将12 g高锰酸钾逐渐加入上述混合液中,时间为30~40 min。然后先将混合液在0℃

下反应 90 min, 再在 35 °C 下反应 2 h。将 80 mL 蒸馏水缓慢滴入上述混合液中进行稀释, 时间为 30 min。再在混合液中加入 200 mL 蒸馏水以及缓慢加入 10 mL 过氧化氢(30%), 搅拌 10 min, 即获得氧化石墨烯悬浮物。用反复水洗以及超声的方法将石墨烯混合液的 pH 值调节至 5 ~ 7, 烘干后制备成浓度为 4 mg/mL 的石墨烯氧化物(GO)溶液。

图 1 为制备 RGO-AgNW 柔性复合电极的示意图。首先, 分别用丙酮、乙醇、去离子水清洗硅片, 烘干后, 旋涂石墨烯氧化物, 在反应釜中分别采用热还原、肼还原的方法, 将其还原成 RGO。再在其上旋涂合适浓度的 AgNW, 以达到增强电极导电性的目的。接着旋涂 NOA63, 紫外曝光 5 min 后固化, 将 RGO-AgNW 复合薄膜从 Si 片上转移至 NOA63 上, 即制成 RGO-AgNW 柔性复合电极<sup>[34]</sup>。

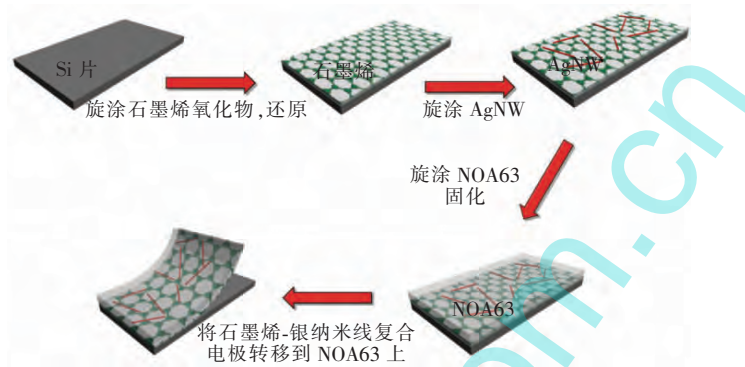


图 1 RGO-AgNW 柔性复合电极制备示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the fabrication of RGO-AgNW hybrid TCE on flexible substrate

### 3 结果与讨论

#### 3.1 银纳米线浓度的选取

AgNW 旋涂在 RGO 上, 可以有效搭接在 RGO

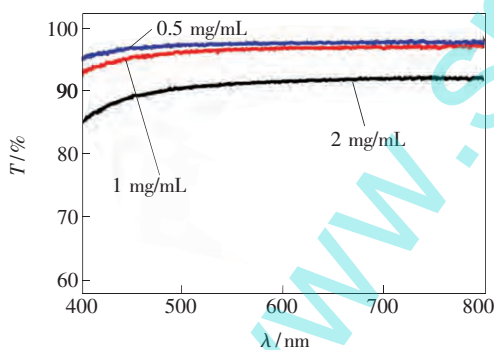


图 2 不同浓度银纳米线(AgNW)制备的薄膜的透过率  
Fig. 2 Optical transmittance of AgNW as a function of concentration

的晶界、褶皱处, 增强电极的导电性能。首先, 我们对 AgNW 的浓度进行优化。在 AgNW 浓度分别为 2, 1, 0.5 mg/mL 时, 其透过率分别为 91%、96% 和 97%, 如图 2 所示, 方块电阻分别为 95, 1 120, 20 000 Ω/□ 以上。本实验中 AgNW 的作用是搭接在 RGO 晶界、褶皱处提高 RGO 导电性能, 所以我们采用自身导电性较低且透过率最高的浓度为 0.5 mg/mL 的 AgNW 用于 RGO-AgNW 复合电极的制备。

#### 3.2 热还原和肼还原方法制备的 RGO 薄膜

实验中, 我们分别采用玻璃、硅片以及石英作为复合电极的衬底, 在其上旋涂石墨烯氧化物, 转速为 1 000 r/min, 时间为 18 s, 石墨烯氧化物的浓度为 4 mg/mL。在温度为 150 °C、时间为 1 h 的条件下, 分别采用热还原和肼还原的方法制备 RGO

表 1 利用热还原和肼还原制备的 RGO 薄膜电阻及转移情况

Table 1 Sheet resistance and transfer result of RGO with thermal reduction and hydrazine reduction

衬底	还原方式	转写前电阻/(Ω · □ <sup>-1</sup> )	转写后电阻/(Ω · □ <sup>-1</sup> )	是否完全转写
玻璃	热还原	15 320	12 852	是
硅片	热还原	11 180	8 583	是
石英	热还原	9 170	8 526	是
玻璃	肼还原	580	476	否
硅片	肼还原	996	280	否
石英	肼还原	899	654	否

薄膜,然后用 NOA63 对其进行转移,实验结果如表 1 所示。

可以看到在相同的还原条件下,不同衬底材料得到的 RGO 薄膜的导电性能也有很大差别。综合对比 3 种衬底,可以看出采用 Si 片和石英衬底的 RGO 薄膜有相对较低的方块电阻,导电性能更好。但石英衬底成本较高,所以我们选用 Si 片作为衬底材料。从表 1 可以看出,将 RGO 薄膜从 Si 片转移到 NOA63 上后,电阻

有较为明显的下降,说明我们转移的手段对优化电极性能有积极的作用。图 3 所示为还原前后的 RGO 的光学显微镜以及原子力显微镜图像。对比可知,利用热还原方法制备石墨烯电极时,因其反应缓和,所以可以实现完全转移;而对于肼还原方法,其反应非常剧烈,在反应过程中会产生气体,使得石墨烯薄膜表面为孔状结构,在用 NOA63 转移时无法实现完全转移,并且表面粗糙度较大。

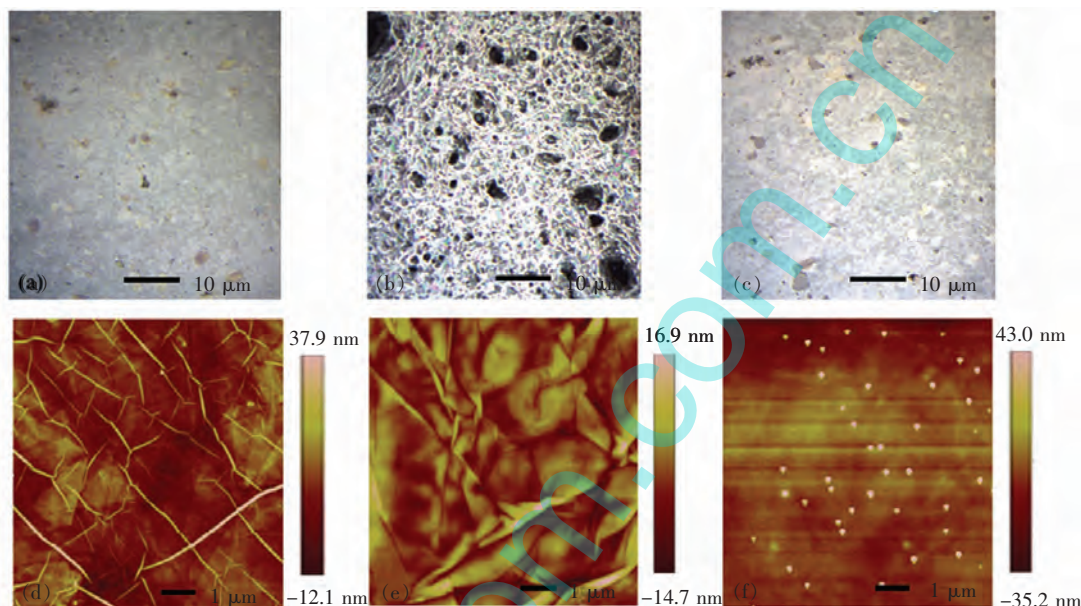


图 3 GO (a)、肼还原 RGO (b)、热还原 RGO (c) 的光学显微镜图像,以及 GO (d)、肼还原 RGO (e)、热还原 RGO (f) 的原子力显微镜图像。

Fig. 3 Optical photographs of GO (a), RGO by hydrazine reduction (b), RGO by thermal reduction (c), and AFM images of GO (d), RGO by hydrazine reduction (e), RGO by thermal reduction (f), respectively.

### 3.3 RGO-AgNW 柔性复合电极的制备

#### 3.3.1 热还原方法

首先,我们将温度提高至 200 °C,还原时间延长至 2 h,采用热还原方法制备 RGO 薄膜。引入银纳米线后,测得用 NOA63 转移前的方块电阻为 3 845 Ω/□,转移后为 2 798 Ω/□,复合电极导电性能有很大程度的提高。进一步将温度提高至 350 °C,还原时间仍为 2 h,得到的 RGO 电极依然可以实现完全转移,转写后方块电阻从 6 020 Ω/□减小到 3 028 Ω/□。引入银纳米线后,RGO-AgNW 复合电极的方块电阻减小更为显著,从 2 980 Ω/□到 1 235 Ω/□,说明银纳米线的引入有效提高了 RGO 的导电性能。

#### 3.3.2 肼还原方法

接着我们对肼还原方法进行优化。在保持

150 °C 的条件下,将还原时间减少至 30 min,引入银纳米线后得到的 RGO-AgNW 复合电极的方块电阻为 513 Ω/□,用 NOA63 转移后得到的方块电阻为 420 Ω/□。图 4 所示为转移前后的 RGO-AgNW 复合电极的扫描电子显微镜图像(SEM),可以看出 RGO-AgNW 的表面平滑度在转写后得到明显改善。转写工艺将原来和超平滑的硅衬底接触的电极界面翻转为电极上表面,其平滑度可以和硅表面的平滑度相比拟,有利于提高电极表面的导电性,因此转写后的表面电阻显著下降。

我们测试了 NOA63 衬底上 RGO-AgNW 复合电极的柔性和机械稳定性,如图 5(a) 所示。可以看到,在前 200 次弯折过程中,柔性电极的电阻从 420 Ω/□上升至 476 Ω/□,然后达到稳定。弯折达到 1 000 次时,其电阻仍可保持在 481 Ω/□。

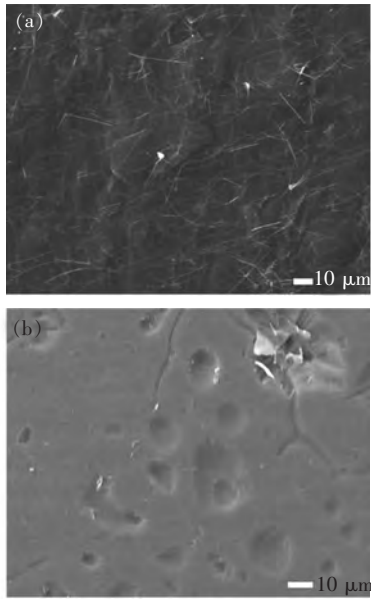


图 4 Si 片 (a) 和 NOA63 (b) 上的 RGO-AgNW 复合电极 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of RGO-AgNW TCE on Si substrate (a) and NOA63 flexible substrate (b)

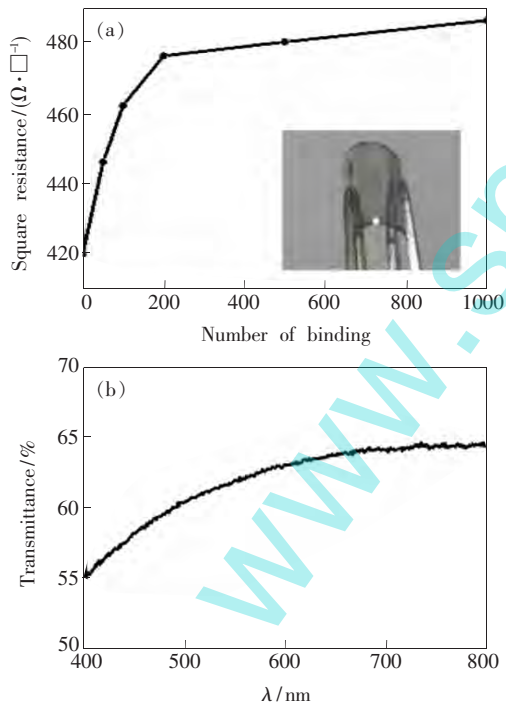


图 5 (a) 柔性衬底 NOA63 上的 RGO-AgNW 复合电极电阻随弯折次数的变化; (b) 柔性复合电极的透过率。

Fig. 5 (a) Measured sheet resistance of GO-AgNW network as a function of the binding number. (b) Transmittance of GO-AgNW network.

图 5 (a) 中的插图为柔性电极弯折时的照片。

图 5 (b) 为 RGO-AgNW 柔性复合电极的透过率，

在 550 nm 处 其透过率可达到 62%。可见 柔性 RGO-AgNW 复合电极适合作为柔性光电器件的电极。

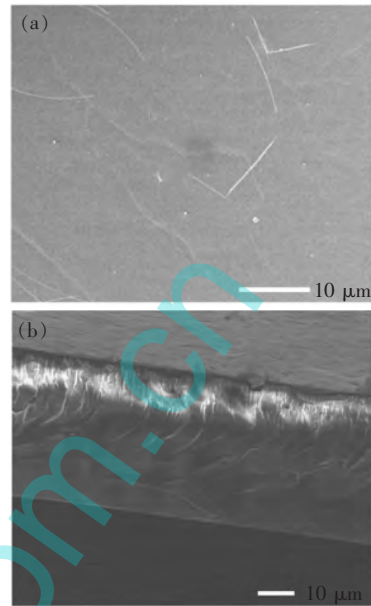


图 6 (a) NOA63 上的 RGO-AgNW 复合电极上旋涂 PEDOT:PSS 后的 SEM 图; (b) NOA63 上的 RGO-AgNW 复合电极上旋涂 PEDOT:PSS 后的 SEM 侧视图。

Fig. 6 (a) SEM image of RGO-AgNW TCE after spin-coating PEDOT:PSS. (b) Cross section SEM image of RGO-AgNW TCE after spin-coating PEDOT:PSS.

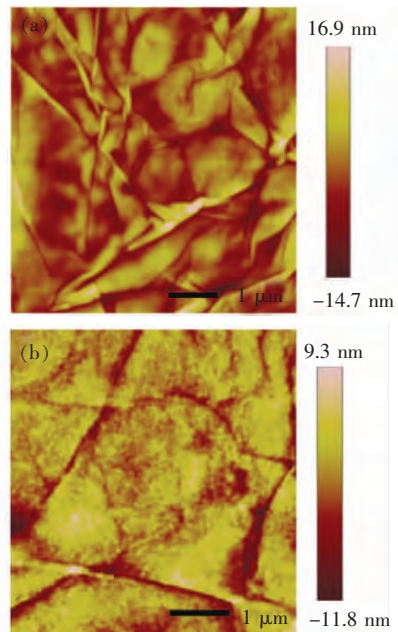


图 7 RGO-AgNW 柔性复合电极在旋涂 PEDOT:PSS 前 (a) 后 (b) 的 AFM 图像

Fig. 7 AFM images of RGO-AgNW TCE before (a) and after (b) spin-coating PEDOT:PSS

经过肼还原的 RGO-AgNW 复合电极未能完全转移到 NOA63 上,表面为坑洼状,如图 4(b) 所示。我们对其进行进一步的优化,在其上旋涂一层 PEDOT:PSS,可以发现其平整度得到了很好的改善,如图 6 所示。通过原子力显微镜(AFM)表征,可以看到旋涂 PEDOT:PSS 后,RGO-AgNW 复合电极的表面粗糙度从 9.40 nm(图 7(a))下降到 2.12 nm(图 7(b)),这为后续器件的制备提供了非常便利的条件。

#### 参 考 文 献:

- [1] Feng J, Li F, Gao W B, *et al.* White light emission from exciplex using tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum as chromaticity-tuning layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(25): 3947-3949.
- [2] Liu Y F, Feng J, Yin D, *et al.* Viewing-angle independence of white emission from microcavity top-emitting organic light-emitting devices with periodically and gradually changed cavity length [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(6): 1597-1601.
- [3] Liang J J, Li L, Tong K, *et al.* Silver nanowire percolation network soldered with graphene oxide at room temperature and its application for fully stretchable polymer light-emitting diodes [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1590-1600.
- [4] Liu Y F, Feng J, Cui H F, *et al.* Fabrication and characterization of Ag film with sub-nanometer surface roughness as a flexible cathode for inverted top-emitting organic light-emitting devices [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(22): 10811-10815.
- [5] Bi Y G, Feng J, Li Y F, *et al.* Broadband light extraction from white organic light-emitting devices by employing corrugated metallic electrodes with dual periodicity [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(48): 6969-6974.
- [6] Small C E, Chen S, Subbiah J, *et al.* High-efficiency inverted dithienogermole-thienopyrroldione-based polymer solar cells [J]. *Nat. Photon.*, 2012, 6(2): 115-120.
- [7] Zhang X L, Song J F, Li X B, *et al.* Optical Tamm states enhanced broad-band absorption of organic solar cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(24): 243901-1-3.
- [8] Jin Y, Feng J, Zhang X L, *et al.* Solving efficiency-stability tradeoff in top-emitting organic light-emitting devices by employing periodically corrugated metallic cathode [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(9): 1187-1191.
- [9] Liu J Q, Yin Z Y, Cao X H, *et al.* Bulk heterojunction polymer memory devices with reduced graphene oxide as electrodes [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(7): 3987-3992.
- [10] Jin Y, Feng J, Xu M, *et al.* Matching photocurrents of sub-cells in double-junction organic solar cells *via* coupling between surface plasmon polaritons and microcavity modes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2013, 1(11): 809-813.
- [11] Kim K S, Zhao Y, Jang H, *et al.* Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes [J]. *Nature*, 2009, 457(7230): 706-710.
- [12] Liu Y F, Feng J, Cui H F, *et al.* Highly flexible inverted organic solar cells with improved performance by using an ultra-smooth Ag cathode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(13): 133303-1-3.
- [13] Lee D, Lee H, Ahn Y, *et al.* Highly stable and flexible silver nanowire-graphene hybrid transparent conducting electrodes for emerging optoelectronic devices [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(17): 7750-7755.
- [14] Chen X, Jia B H, Zhang Y N, *et al.* Exceeding the limit of plasmonic light trapping in textured screen-printed solar cells using Al nanoparticles and wrinkle-like graphene sheets [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2013, 2: e92.
- [15] Han T H, Lee Y B, Choi M R, *et al.* Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode [J]. *Nat. Photon.*, 2012, 6(2): 105-110.
- [16] Bi Y G, Feng J, Li Y F, *et al.* Arbitrary shape designable microscale organic light-emitting devices by using femtosecond laser reduced graphene oxide as a patterned electrode [J]. *ACS Photon.*, 2014, 1(8): 690-695.
- [17] Sun M T, Zhang Z L, Wang P J, *et al.* Remotely excited Raman optical activity using chiral plasmon propagation in Ag nanowires [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2013, 2: e112.

#### 4 结 论

制备了电学性能和光学性能优异的 RGO-AgNW 柔性复合电极,其方块电阻可优化至 420  $\Omega/\square$ ,550 nm 处的透过率可达 62%,且展现了良好的柔性和机械稳定性。本文制备的 RGO-AgNW 柔性复合电极在光电器件,特别是柔性器件中将有光明的应用前景。

- [18] Kholmanov I N, Stoller M D, Edgeworth J, *et al.* Nanostructured hybrid transparent conductive films with antibacterial properties [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(6): 5157-5163.
- [19] Liu J Q, Lin Z Q, Liu T J, *et al.* Multilayer stacked low-temperature-reduced graphene oxide films: Preparation, characterization, and application in polymer memory devices [J]. *Small*, 2010, 6(14): 1536-1542.
- [20] Kou L J, Li F S, Guo T L, *et al.* Preparation of blue light-emitting graphene quantum dots from carbon nanotube and application in nonvolatile polymer memory devices [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(5): 618-622 (in Chinese).
- [21] Papasimakis N, Thongrattanasiri S, Zheludev N I, *et al.* The magnetic response of graphene split-ring metamaterials [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2013, 2: e78.
- [22] Huang H Z, He Y Q, Li W Y, *et al.* Photoelectric conversion properties of graphene oxide film prepared by electrochemical deposition [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(2): 142-148 (in Chinese).
- [23] Apalkov V, Stockman M I. Proposed graphene nanospaser [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2014, 3: e191.
- [24] Huang X, Yin Z Y, Wu S X, *et al.* Graphene-based materials: Synthesis, characterization, properties, and applications [J]. *Small*, 2011, 7(14): 1876-1902.
- [25] Wan X J, Long G K, Lu H, *et al.* Graphene—A promising material for organic photovoltaic cells [J]. *Adv. Mater.*, 2011, 23(45): 5342-5358.
- [26] Wu X X, Li F S, Wu W, *et al.* Flexible organic light emitting diodes based on double-layered graphene/PEDOT:PSS conductive film [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(4): 486-490 (in Chinese).
- [27] Zedan A F, Moussa S, Terner J, *et al.* Ultrasmall gold nanoparticles anchored to graphene and enhanced photothermal effects by laser irradiation of gold nanostructures in graphene oxide solutions [J]. *ACS Nano*, 2012, 7(1): 627-636.
- [28] Wu Z S, Ren W C, Gao L B, *et al.* Synthesis of high-quality graphene with a pre-determined number of layers [J]. *Carbon*, 2009, 47(2): 493-499.
- [29] Zhang Y L, Guo L, Wei S, *et al.* Direct imprinting of microcircuits on graphene oxides film by femtosecond laser reduction [J]. *Nano Today*, 2010, 5(1): 15-20.
- [30] Zhang Y L, Chen Q D, Xia H, *et al.* Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing [J]. *Nano Today*, 2010, 5(5): 435-448.
- [31] Guo L, Jiang H B, Shao R Q, *et al.* Two-beam-laser interference mediated reduction, patterning and nanostructuring of graphene oxide for the production of a flexible humidity sensing device [J]. *Carbon*, 2012, 50(4): 1667-1673.
- [32] Kholmanov I N, Magnuson C W, Aliev A E, *et al.* Improved electrical conductivity of graphene films integrated with metal nanowires [J]. *Nano Lett.*, 2012, 12(11): 5679-5683.
- [33] Kholmanov I N, Domingues S H, Chou H, *et al.* Reduced graphene oxide/ copper nanowire hybrid films as high-performance transparent electrodes [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2): 1811-1816.
- [34] Liu Y F, Feng J, Zhang Y F, *et al.* Improved efficiency of indium-tin-oxide-free flexible organic light-emitting devices [J]. *Org. Electron.*, 2014, 15(2): 478-483.



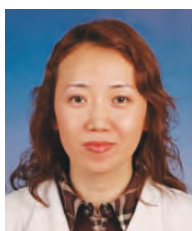
李云飞(1990-),女,河北张家口人,硕士研究生,2012年于吉林大学获得学士学位,主要从事石墨烯及有机光电器件的研究。

E-mail: liyunfei19900301@163.com



李传南(1969-),男,江西莲花人,教授,2001年于吉林大学获得博士学位,主要从事有机半导体器件和集成电路设计方面的研究。

E-mail: licn@jlu.edu.cn



王继萍(1965-),女,吉林长春人,2007年于吉林大学获得博士学位,主要从事影像诊断工作。

E-mail: wangjiping@yahoo.com.cn