

硅胶基衬底表面高分辨复杂可延展电路的印刷制备

袁伟, 顾唯兵, 林剑, 崔铮

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所印刷电子技术中心, 苏州 215123

摘要 柔性可延展电子因其能够适应非平面工作环境, 将突破现有电子器件的应用范围, 促进信息与人的融合, 在智能穿戴电子、柔性显示、生物医疗等领域具有广阔的应用前景。本文提出利用印刷结合真空抽滤方法实现硅胶基衬底表面高分辨复杂可延展电路的制备; 研究了丝网印刷工艺实现微孔滤膜表面银纳米线(Ag NWs)图形化沉积的分辨率; 讨论了Ag NWs线长、抽滤真空度等因素对沉积分辨率的影响, 实现了Ag NWs图形化50 μm线径分辨率及间隔分辨率。本文还研究了硅胶基衬底表面微电极的电阻均一性及拉伸电阻稳定性, 并结合电极表面微结构的变化详细讨论了屈曲褶皱结构的出现对微电极拉伸电阻的影响, 实现了100 μm线宽微电极100%拉伸幅度下电阻增加仅为初始值的40%。最后, 通过集成LED芯片演示了面料基底表面柔性可延展发光电路。本研究对于柔性可延展电路的制备提供了新的思路。

关键词 丝网印刷; 真空抽滤; 银纳米线; 可拉伸电路; 智能面料

目前, 柔性电子^[1-2]的发展按照基底的种类分类主要包括: 薄膜电子、纸基电子、纺织电子、硅胶基电子等。目前, 以薄膜基(PET、PI、PEN等塑料薄膜基底)电子发展最为迅速, 主要得益于近几年全球产业界对柔性显示、薄膜光伏的大力推进。例如, 国外企业三星电子(SAMSUNG)、乐喜金星(LG)、日本显示(JDI)、夏普(SHARP)等在柔性有机发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)商用方面起到积极作用, 国内企业维信诺、京东方、天马微电子等也在积极布局柔性显示研发与产业化。国家层面, 在顶层设计对于中国柔性显示及薄膜光伏产业的发展给予了明确规划, 国家发改委及工信部印发的《关于实施制造业升级改造重大工程包的通知》中要求重点发展有机发光半导体显示(active-matrix organic light emitting diode, AMOLED)等新一代显示面板的量产技术, 推动关键共性技术联合开发和产业化示范; 布局量子点、柔性显示等前瞻技术领域。同时明确将印刷OLED技术列为国家“十三五”重点支持的研发项目之一, 由广东聚华印刷显示技术有限公司承担的国家重点研发计划战略性先进电子材料重点专项“印刷OLED显示技术集成与研发公共开放平台”已于2016年10月立项, 目前正处于研究阶段。

有别于塑料薄膜基底材料平整光滑的表面, 纸基和纺织面料基衬底由于其特有的多孔结构, 必然给电子器件的制备

带来极大的挑战。目前主要处于实验室研发阶段, 相应的薄膜纸电池^[3]、织物超级电容器^[4]、穿戴式能量收集器^[5]等新颖的电子器件结构也有很多报道, 纸基和面料基电子发展未来有很明确的应用导向, 例如智能包装、智能穿戴等。硅胶基材料由于具有类似人体的柔软特性, 被广泛应用在智能软体机器人表面。随着人工智能的发展, 软体机器人硅胶材料表面必然需要集成大量的传感器及互联导线, 因此硅胶基电子应运而生, 硅胶基是柔性可延展电子, 即使在外力作用下发生弯折、扭曲、拉伸、压缩等形变仍能保持正常功能。

目前, 对于柔性可延展电路的制备方法主要包括两大类: 一种方法是利用特殊结构实现可拉伸, 如: 屈曲褶皱结构^[6]、S型自相似结构^[7]、螺旋结构^[8]、多孔导电网络结构^[9-10]等, 其中以美国伊利诺伊大学Rogers研究组与西北大学黄永刚研究组为首的研究团队在可延展柔性电子器件的研究上取得成果最为突出, 在《Science》《Nature》多次公开报道了柔性电子技术的相关研究成果^[11-15]。通过力学屈曲原理巧妙设计器件中连接导线的S型自相似微结构, 实现不同形式、不同功能的可延展柔性电子器件^[16-17]。其中屈曲互联导线的制备通常使用的是微加工光刻工艺, 尽管能够保证互联导线高的分辨率, 及拉伸电阻稳定性, 但是由于微加工工艺本身流程的复杂性导致其生产成本昂贵, 不利于柔性可延展电子未来的

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2017-08-01

基金项目: 国家重点基础研究计划(973计划)项目(2015CB351900); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51603227)

作者简介: 袁伟, 助理研究员, 研究方向为柔性可拉伸电子, 电子信箱: wyuan2014@sinano.ac.cn; 崔铮(通信作者), 研究员, 研究方向为微纳米加工技术及其应用, 电子信箱: zcui2009@sinano.ac.cn

引用格式: 袁伟, 顾唯兵, 林剑, 等. 硅胶基衬底表面高分辨复杂可延展电路的印刷制备[J]. 科技导报, 2017, 35(17): 73-79; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.17.009

大面积工业化生产;另一种方法是利用特殊材料^[18-22]实现可拉伸,例如通过银纳米线(Ag NWs)、碳纳米管(CNT)、石墨烯(graphene)等纳米导电填料跟弹性聚合物形成复合纳米导电材料,不需要设计特殊结构就能实现拉伸导电,其中日本东京大学 Someya 研究组在可拉伸导电浆料方面做出了杰出的工作^[18]。通过印刷的方法在硅胶基衬底表面实现了可拉伸电路的制备,并且在 200% 拉伸幅度下仍然具有导电特性,尽管这种方法能够实现大面积可拉伸电路的廉价制备,但是低的导电率及明显的拉伸电阻变化极大的限制了其在功能电路中的应用。

本文利用印刷技术结合真空抽滤方法实现了柔性可延展电路的制备,讨论 Ag NWs 图形化分辨率的影响因素,研究微电极电学性质的均一性及拉伸特性,理解表面微结构的形成对其拉伸电阻稳定性的影响,最后在其表面集成 LED 芯片,展示可拉伸 LED 发光电路及在纺织面料表面的穿戴应用。

2 实验研究

实验材料:使用的 Ag NWs 产品规格为直径 90 nm,线长 10~15 μm ,固含量为 10 mg/mL,分散液为乙醇(中国济南美高纳米材料有限公司);聚二甲基硅氧烷(PDMS),基本组分与固化剂质量比例为 10:1(美国道康宁公司 SYLGARD 184 型号);微孔滤膜为赛多利斯 11807-47 及 11807-100 两种型号聚四氟乙烯微孔滤膜,孔径为 0.2 μm ;丝网印刷网板,目数 325、线

径 20 μm 、厚度 7 μm (苏州赫日光电有限公司)。

Ag NWs 分散液的配置:为精确控制单位面积 Ag NWs 的沉积量,采用的烘干称重法配置分散液。首先对购买的未确定浓度的 Ag NWs 分散液进行稀释。准备两个 1.5 mL 离心管,精确称其质量,然后通过移液器分别抽取 1 mL 样品放入离心管中,接着放入鼓风干燥箱中,80 $^{\circ}\text{C}$ 烘 4 h,自然冷却后再分别称其质量,最后通过计算得到 Ag NWs 分散液的精确浓度。

Ag NWs/PDMS 高分辨复杂可拉伸电路的制备:具体制备流程如图 1 所示。第 1 步,微孔滤膜表面丝网印刷。首先通过氧等离子对聚四氟乙烯微孔滤膜表面进行处理,然后利用丝网印刷方法在微孔滤膜表面印刷液态 PDMS,为看清印刷图形,PDMS 被染成蓝色,印刷完成后,样品立即放入 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥 30 min,使得印刷的 PDMS 快速固化,得到相应图形。第 2 步,真空抽滤沉积 Ag NWs。固化完全的微孔滤膜通过真空抽滤的方法,在其表面沉积 Ag NWs,由于微孔滤膜表面印刷的液态 PDMS 固化后形成了一层致密的薄膜,覆盖了滤膜的孔洞,因此使得 Ag NWs 能够选择性的沉积,即 PDMS 覆盖的区域 Ag NWs 无法沉积,未被覆盖的区域,Ag NWs 均匀沉积,得到图形化的 Ag NWs 薄膜。第 3 步,浇筑液态 PDMS,固化后揭除滤膜。Ag NWs 图形化沉积在滤膜表面后,放入真空干燥箱中室温干燥 1 h,然后在其表面浇筑液态 PDMS,待 PDMS 完全渗透到 Ag NWs 导电网络空隙中后,60 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 6 h,最后小心揭除滤膜,得到高分辨复杂可拉伸图形。

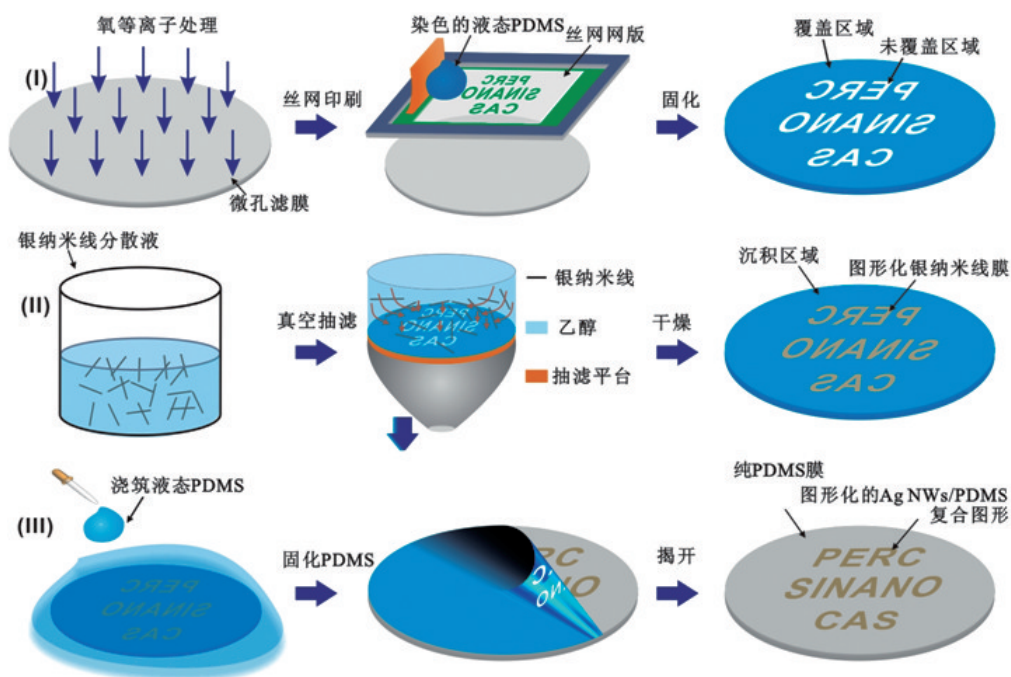


图1 Ag NWs/PDMS 高分辨复杂可拉伸电路的制备流程示意

Fig. 1 Schematic illustration of the fabrication process of Ag NWs/PDMS flexible and stretchable electrode with high resolution

实验过程中图形结构如图 1 所示,目标图形为“PERC, SINANO, CAS”英文字母(印刷电子学部,中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所和中国科学院的英文简称)。需要注意的是,在设计丝网印刷网版图形的时候需要保证滤膜表面印刷未被 PDMS 覆盖区域的图形为目标图形的水平镜像结构,从而能够保证 Ag NWs 沉积图形为目标图形的水平镜像结构图形。在整个过程中,关键是第一步丝网网版的定制,其决定了最终的目标图形,因此在实验开始前必须根据目标图形设计定制好丝网网版图形。

拉伸电学测试方法:实验室自行搭建的拉伸电学测试系统,其中利用微流泵(保定兰格,拉伸移动速度可调)进行样品拉伸实验,同时利用数字源表(Keithley2400)进行拉伸形变过程中的电学性质同步测试。

3 结果与分析

丝网印刷工作原理相对简单^[23],其本质是通过刮刀对丝网表面的浆料进行移动刮压,使其透过丝网的图案区域渗透到基底材料表面,从而实现图案的印刷。由于 PDMS 是透明的,为看清印刷得到的图形,对其进行染色,着色过程不会影响其固化成膜特性。如图 1 所示,在白色微孔滤膜表面印刷一层图形化的蓝色聚合物薄膜,可以看出印刷得到的蓝色图案为目标图案的水平镜像结构的反向结构图形,滤膜表面未被蓝色薄膜覆盖的区域图案即为目标图案的水平镜像结构图案,通过微观 SEM 照片(图 2(a))可以看出,印刷图案边缘非常整齐,薄膜覆盖区跟未覆盖区明显区分。对印刷薄膜覆盖区放大观察可以清楚看到(图 2(b)),PDMS 渗透到微孔滤膜的孔洞中,在表面形成致密的聚合物层,没有发现明显的

孔洞或裂纹缺陷。然后通过真空抽滤,在负压作用下,高长径比的 Ag NWs 均匀的沉积在未被聚合物覆盖的区域,如图 1 所示,得到图形化的 Ag NWs 导电薄膜,即为目标图形的水平镜像结构图形。同样,通过微观 SEM(图 2(c))观察可以看出,Ag NWs 图形边缘非常整齐,PDMS 覆盖区域表面没有 Ag NWs 沉积,未被覆盖区域表面 Ag NWs 均匀沉积形成导电网络薄膜,如图 2(d)所示。Ag NWs 图形化沉积完毕后,为实现可拉伸,必须在其表面浇注液态 PDMS,静置待液态 PDMS 渗透到 Ag NWs 网络空隙中后,再加热固化形成 Ag NWs/PDMS 复合体系,最后揭掉滤膜得到目标图形的可拉伸结构。图 2(e)展示了图形边缘微观结构,可以清楚看出纯 PDMS 区域跟 Ag NWs/PDMS 复合区域边界非常整齐。需要说明的是,Ag NWs/PDMS 复合导电区域表面粗糙度较大,通过放大的 SEM 照片可以看出很明显的突起物,如图 2(f)中红色虚线标记处。对于突起物的形成,经过验证是由于液态 PDMS 渗透到 Ag NWs 导电网络空隙中的同时,也会进一步渗透进微孔滤膜的孔洞中,经过加热固化后,揭开滤膜后在其表面形成 PDMS 的突起物,尽管有这些凸起结构的存在,但是并没有影响其导电性,需要进一步说明的是,表面粗糙度确实会对这种图形化的柔性可拉伸电极在 TFT、OPV、OLED 等器件结构中的应用有影响,因为这些器件需要的电极界面平整度要求较高,但是对于普通低频导电电路是没有任何影响的,对于其电学性质,后面会进行具体说明。

图 3(a)展示了制备得到的图形化 Ag NWs/PDMS 复合电极,为“PERC, SINANO, CAS”英文字母,这种复合电极具有非常好的柔软特性,可以进行任意角度的弯曲和扭曲,并且能够实现 100%幅度的拉伸,如图 3(b)所示。为进一步验证

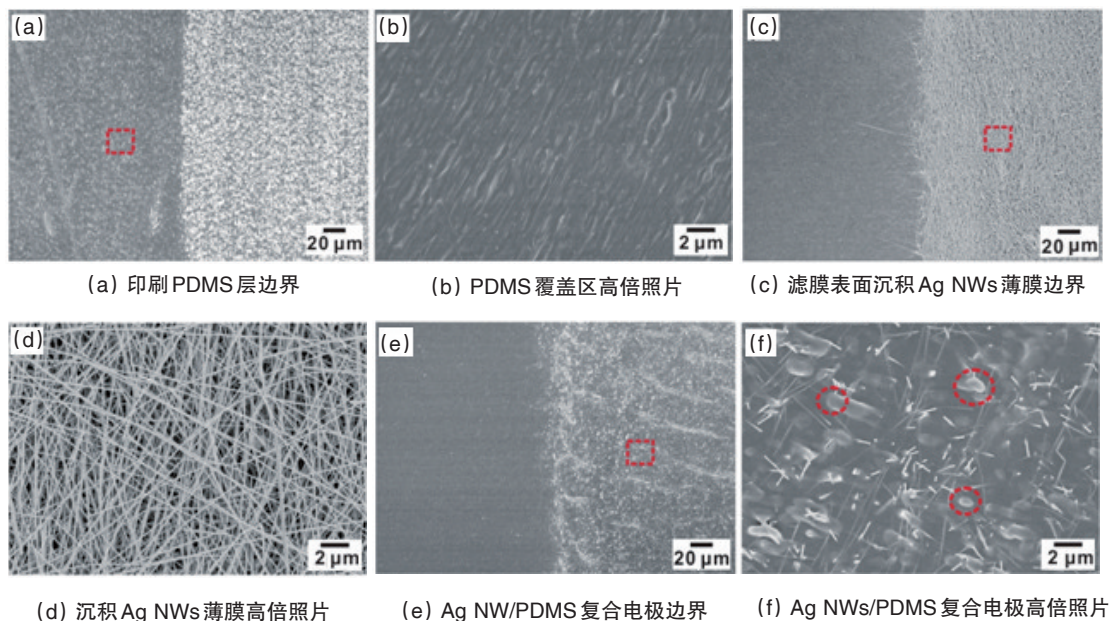


图 2 样品制备过程中的 SEM 照片
Fig. 2 SEM images through the printing

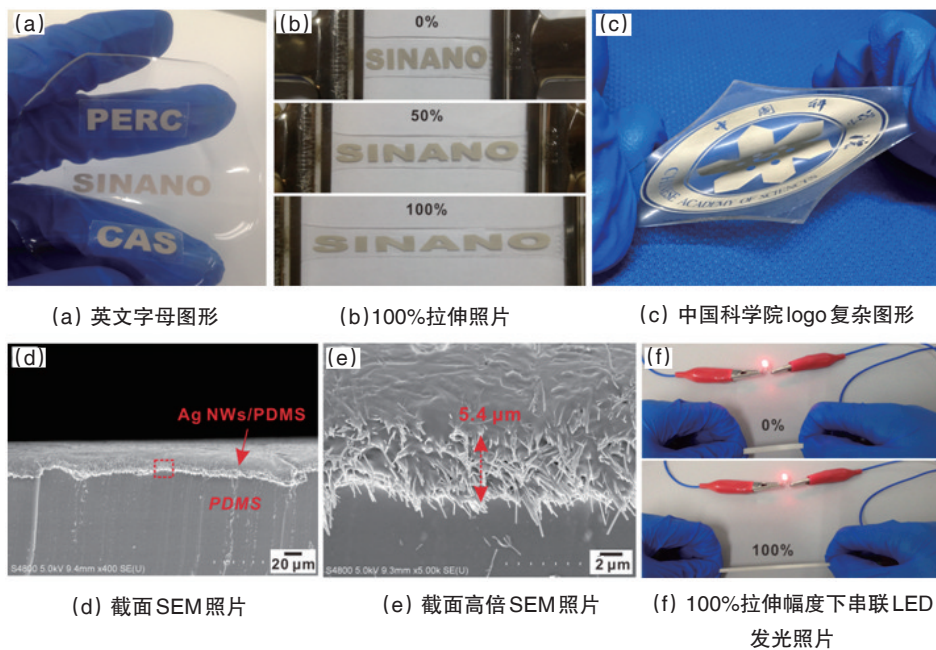


图3 图形化可拉伸电极光学照片及截面SEM照片

Fig. 3 Tensile strain and SEM images

这种方法制备图形化 Ag NWs/PDMS 复合电极的能力,除了简单英文字母图形外还制备了更为复杂的柔性可拉伸图形,如图3(c)所示,中国科学院的logo,其中有复杂的文字笔画,但都能清晰地实现图形化,并且样品可以任意折叠、扭曲、甚至拉伸,不会破坏其图形结构。图3(d)展示了复合电极的截面SEM照片,可以看出柔性电极具有双层结构,上层为 Ag NWs/PDMS 复合导电弹性体,下层为纯 PDMS^[22]。通过放大 SEM 照片(图3(e)),可以清楚地看出 Ag NWs/PDMS 复合弹性导电层,Ag NWs 无序排列嵌在 PDMS 弹性体内部,并且通过测量得出其膜厚约为 5.4 μm (0.5 mg/cm² Ag NWs 沉积量),复合弹性导电层的厚度可以通过 Ag NWs 单位面积沉积量进行调控。图3(f)展示了弹性导线跟 LED 串联形成一个简单回路,可以发现 100%应变幅度下,LED 发光亮度几乎没有变化。

Ag NWs 导电网络图形化的分辨率决定了最终可拉伸电极的图形化分辨率。Ag NWs 的图形化本身是一个非常困难的事情,由于其特殊的一维线性结构,不同于纳米颗粒,很难实现高分辨的图形化。本研究使用的印刷结合抽滤的方法能够很好地解决 Ag NWs 图形化的问题。通过实验发现,影响 Ag NWs 图形化分辨率的主要因素包括:滤膜表面 PDMS 印刷分辨率、真空抽滤过程中的真空度、Ag NWs 的线长尺寸。1) 滤膜表面 PDMS 印刷分辨率直接影响 Ag NWs 沉积分辨率,目前工业界丝网印刷的分辨率为 20 μm 左右,通过实验发现,PDMS 的印刷分辨率能够达到 20 μm,即未被覆盖区域的分辨率达到 20 μm,但实验中,20 μm 的印刷分辨率无法较长距离的实现,通过对样品微观观察,很多位置会出现断线情况,因此认为 20 μm 印刷分辨率能够实现,但不稳定;实验发现 50 μm 的印刷分辨率能够轻松地实现,不会出现断线

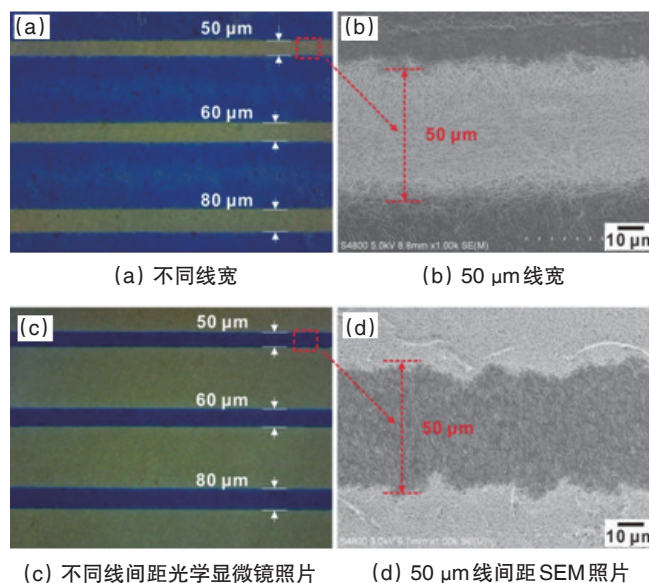


图4 Ag NWs 沉积不同线宽、间隔照片

Fig. 4 Optical microphotograph of patterned Ag NWs electrodes with various line widths

等问题。2) 抽滤真空度同样影响 Ag NWs 沉积分辨率。印刷完成后在真空抽滤过程中,真空度问题对 Ag NWs 沉积分辨率影响也很大,如果真空度较低,没有足够的负压促使 Ag NWs 沉积到未被 PDMS 覆盖的区域,导致在 PDMS 覆盖区域也会出现少量的 Ag NWs 沉积,这样极易造成电极之间的短路,影响 Ag NWs 沉积分辨率。3) 银纳米线长度也直接影响其图形化分辨率。例如,线长达到 100 μm,但若要实现 50 μm 的图形化分辨率,在不破坏 Ag NWs 结构的情况下基本不

可能。因此,只有在协调以上3个因素的情况下,才能实现一个最优的Ag NWs沉积分辨率。如图4所示,目前可以实现 $15\ \mu\text{m}$ 左右线长Ag NWs的沉积分辨率达到 $50\ \mu\text{m}$,包括线径分辨率(图4(a))及间隔分辨率(图4(c)),图4(b)展示了 $50\ \mu\text{m}$ 线宽的Ag NWs导线,可以看出边界非常整齐,同时图4(d)展示了 $50\ \mu\text{m}$ 间隔SEM照片,同样可以看出间隔区域实现完全隔离。

为研究Ag NWs/PDMS复合电极的电阻均匀性,制备了 15×10 微电极阵列,如图5(a)所示。电极线宽为 $200\ \mu\text{m}$,Ag NWs沉积浓度为 $0.5\ \text{mg}/\text{cm}^2$,通过2400源表配合探针台对每一个电极进行电阻测试,图5(b)展示了150个微电极电阻分布情况,可以看出电阻分布范围非常窄,偏差仅有 $\pm 0.61\ \Omega$,150个微电极相互间电阻变化没有超过 $1\ \Omega$,具有非常好的电阻均匀性。为说明不同样品间的电阻均一性,制备了6个样品,分别测试其表面150个微电极电阻情况,如图5(c)所示,每个样品表面150个微电极电阻偏差都不超过 $1\ \Omega$,并且在 $0.5\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 沉积浓度的标准下,每个样品表面统计的微电极

电阻非常接近,说明了不同样品间电学性质也非常接近。为研究Ag NWs/PDMS复合电极的拉伸电学性质,如图5(d)所示,制备了线宽 $100\ \mu\text{m}$,长度 $3\ \text{cm}$ 的拉伸电极。样品拉伸过程中,通过2400源表对电阻数据进行连续采集,如图5(e)所示,样品初始拉伸幅度由0%增加到100%的过程中,电阻由 $35.9\ \Omega$ 增加到 $71.7\ \Omega$,增加了一倍,随后释放应力,电阻并没有回复到初始值的 $35.9\ \Omega$,而是回复到 $49.1\ \Omega$,当再一次进行100%拉伸的时候,电阻由 $49.1\ \Omega$ 增加到 $68.9\ \Omega$,仅仅增加了40%,并且回缩后,电阻能回复到 $49\ \Omega$ 。有意思的是,后续几次100%拉伸回缩,电阻变化曲线基本一致,如图5(f)所示。对于拉伸电阻变化曲线,可以通过样品表面形貌变化进行合理解释。初始拉伸过程中,上层复合导电弹性体由于应变使得Ag NWs之间出现相对滑移^[24],当应力释放后,下层PDMS可以完全回复到原来的状态,但是由于Ag NWs与PDMS之间的摩擦力,使得Ag NWs不能完全恢复到初始的位置,因此第一次100%拉伸回缩过程中,电阻无法回复到初始值。回缩过程中由于Ag NWs/PDMS复合层无法继续回缩,

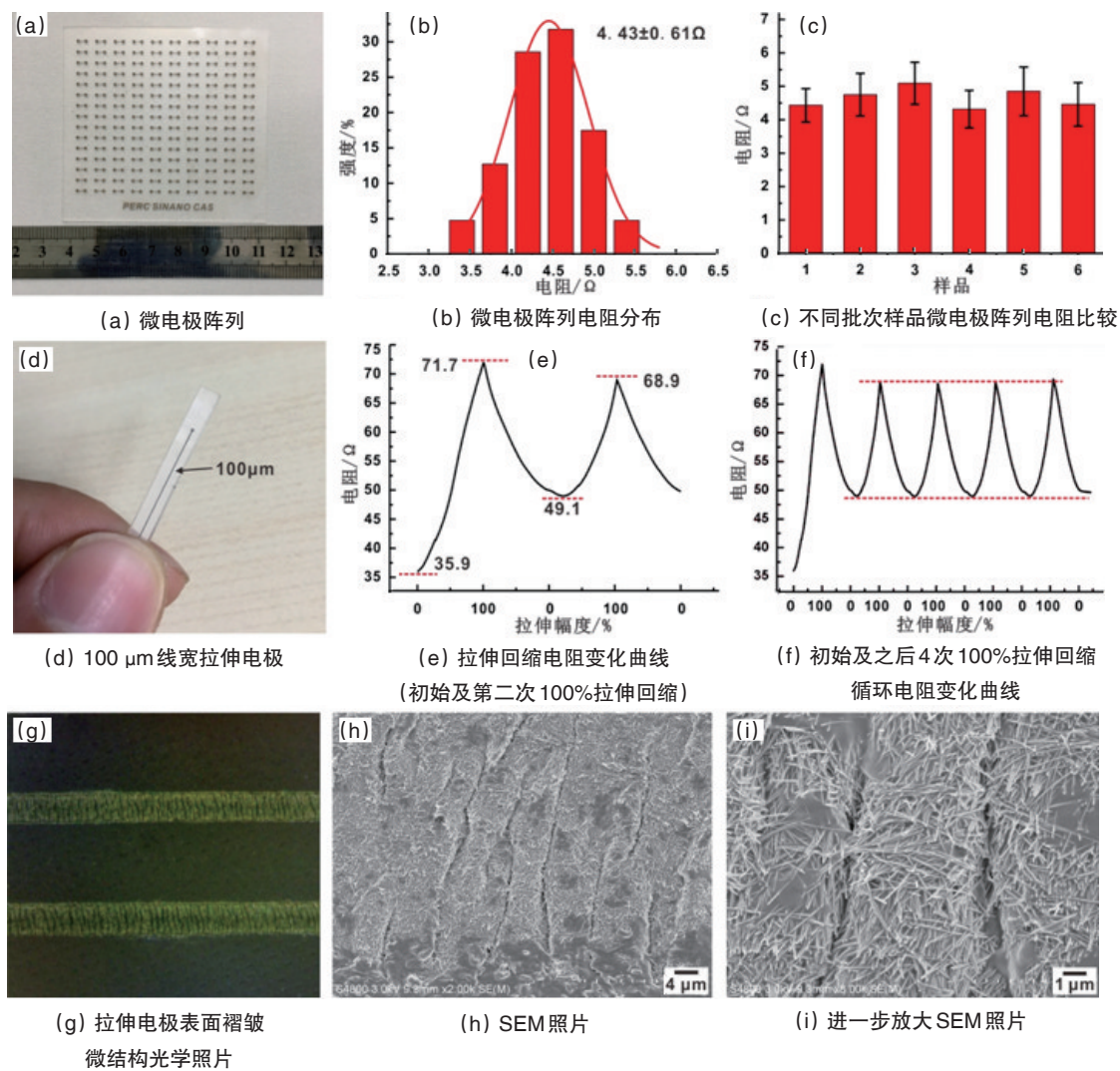


图5 微电极电阻分布均一性及拉伸电学特性

Fig. 5 Distribution, uniformity and tensile electrical properties of microelectrodes

因此在下层PDMS回缩带动下,复合层发生整体屈曲,表面出现褶皱结构,如图5(g)~5(i)所示。由于褶皱结构的出现,所以后续100%拉伸回缩过程中,微观层面其实就是Ag NWs/PDMS复合层褶皱的打开与恢复,由于没有涉及到Ag NWs相互间的滑移,所以拉伸电阻变化较小,并且能够完全恢复到初始值。

前面详细介绍了印刷制备Ag NWs/PDMS复合弹性体的拉伸电学性质及表面形貌变化,下面介绍目前实现的一些具有可延展特性的柔性电路,验证硅胶衬底表面可拉伸电路的应用,如图6所示。首先通过集成LED单元实现了RGB三色

发光柔性电路,并且在弯折,卷曲状态下仍能正常工作(图6(a)~(c))。进一步将柔性可拉伸电极集成到纺织面料表面(图6(e)),详细结构如图6(d)所示,底层为面料结构,中间层为PDMS,最上层为Ag NWs/PDMS复合导电层,由于面料衬底嵌入在中间层PDMS中,所以可拉伸电极跟面料衬底之间具有很好的结合力,因此在拉伸过程中不会发生脱离现象,如图6(f)所示。同时将可拉伸LED发光阵列电路集成到面料表面(图6(g)~(i)),得到智能发光面料,并且在折叠、拉伸状态下保持正常工作,因此可以应用在运动服装表面,实现一些功能电路。

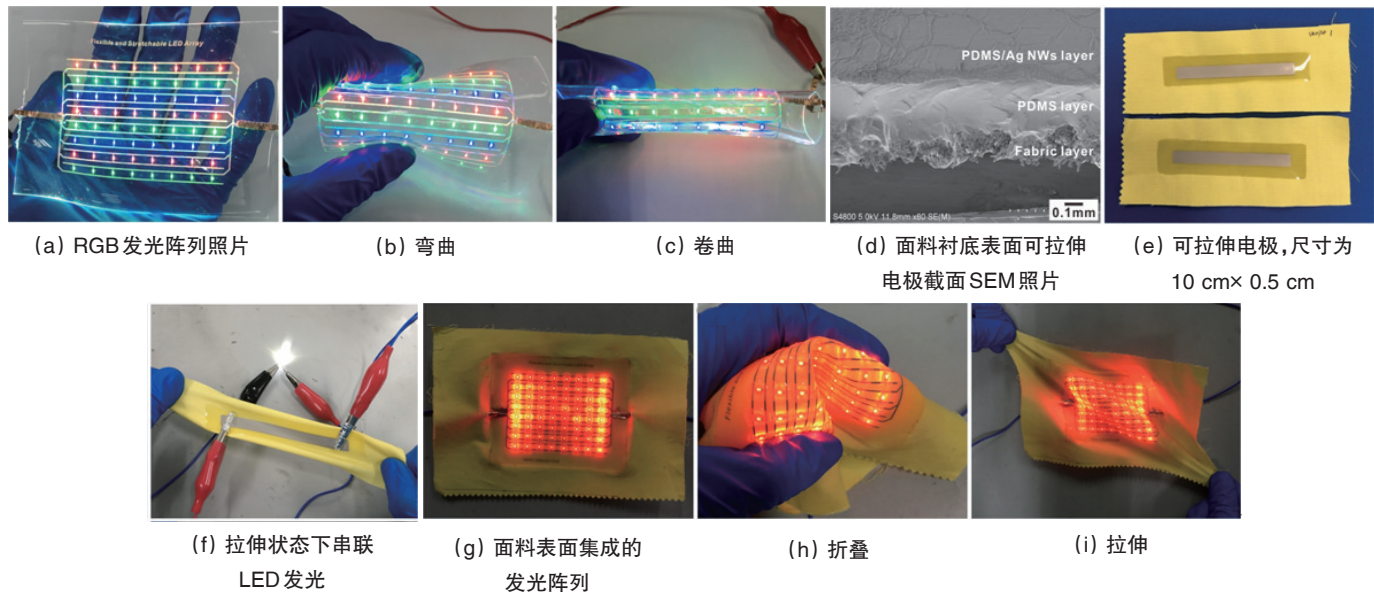


图6 集成LED可拉伸发光电路应用

Fig. 6 Application of integrated LED stretchable light emitting circuits

5 结论

通过丝网印刷结合真空抽滤的方法实现了高分辨复杂可延展电路的制备,在不破坏Ag NWs本身结构的情况下,实现了Ag NWs图形化50 μm线径分辨率及间隔分辨率,并且通过控制单位面积表面Ag NWs沉积量,实现对可拉伸电极电学性质的调控。实验结果表明本方法制备得到的柔性可拉伸电极具有很好的电学均一性,同时通过观察发现,柔性电极拉伸过程中表面屈曲褶皱微结构的出现,有助于提高其拉伸电阻稳定性。最后通过跟纺织面料的集成,实现了可拉伸智能发光面料的应用,为硅胶基可拉伸电子商业应用提供可能。

对于柔性可延展电路,尤其是高分辨复制电路图形的制备提供了一种新方法,相比较目前微纳加工光刻工艺,具有流程简单、成本较低、方便快捷等特点,为实现柔性电子的商业化应用提供了可能。但是同时也必须指出,目前得到的柔性电路拉伸过程中其电阻会发生变化,因此有关导线拉伸电阻变化对于整个电路中信号采集及噪声处理等的影响将会是未来需要重点研究的方向。

参考文献 (References)

- [1] Park S, Vosguerichian M, Bao Z. A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(5): 1727-1752.
- [2] Zang Y, Zhang F, Di C A, et al. Advances of flexible pressure sensors toward artificial intelligence and health care applications[J]. *Materials Horizons*, 2015, 2(2): 25-59.
- [3] Suga T, Konishi H, Nishide H. Photocrosslinked nitroxide polymer cathode-active materials for application in an organic-based paper battery [J]. *Chemical Communications*, 2007, 43(17): 1730-1732.
- [4] Yue B, Wang C, Ding X, et al. Polypyrrole coated nylon lycra fabric as stretchable electrode for supercapacitor applications[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 68(5): 18-24.
- [5] Soin N, Shah T H, Anand S C, et al. Novel "3-D spacer" all fibre piezoelectric textiles for energy harvesting applications[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(5): 1670-1679.
- [6] Niu Z, Dong H, Zhu B, et al. Highly stretchable, integrated supercapacitors based on single-walled carbon nanotube films with continuous reticulate architecture[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(7): 1058-1064.
- [7] Fan J A, Yeo W H, Su Y, et al. Fractal design concepts for stretchable electronics[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(2): 3266.
- [8] Yang Z, Deng J, Chen X, et al. A highly stretchable, fiber-shaped su-

- percapacitor[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(50): 13453–13457.
- [9] Guo C F, Ren Z. Flexible transparent conductors based on metal nanowire networks[J]. *Materials Today*, 2015, 18(3): 143–154.
- [10] Guo C F, Sun T, Liu Q, et al. Highly stretchable and transparent nanomesh electrodes made by grain boundary lithography[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3121.
- [11] Gao L, Zhang Y, Malyarchuk V, et al. Epidermal photonic devices for quantitative imaging of temperature and thermal transport characteristics of the skin[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(5): 4938.
- [12] Kim D H, Viventi J, Amsden J J, et al. Dissolvable films of silk fibroin for ultrathin conformal bio-integrated electronics[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(6): 511–517.
- [13] Jang K I, Han S Y, Xu S, et al. Rugged and breathable forms of stretchable electronics with adherent composite substrates for transcutaneous monitoring[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(5): 4779.
- [14] Kim D H, Lu N, Ma R, et al. Epidermal electronics[J]. *Science*, 2011, 76(6): 485–486.
- [15] Kim R H, Kim D H, Xiao J, et al. Waterproof AlInGaP optoelectronics on stretchable substrates with applications in biomedicine and robotics[J]. *Nature Material*, 2010, 9(11): 929–37.
- [16] Xu S, Yan Z, Jang K I, et al. Assembly of micro/nanomaterials into complex, three-dimensional architectures by compressive buckling[J]. *Science*, 2015, 347(6218): 154–159.
- [17] Kim D H, Kim Y S, Wu J, et al. Ultrathin silicon circuits with strain-isolation layers and mesh layouts for high-performance electronics on fabric, vinyl, leather, and paper[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(36): 3703–3707.
- [18] Matsuhisa N, Kaltenbrunner M, Yokota T, et al. Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications[J]. *Nature Communications*, 2015, doi:10.1038/ncomms8461.
- [19] 袁伟, 林剑, 顾唯兵, 等. 基于银纳米线柔性可延展电路的印刷制备[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2016, 46(4): 044611.
Yuan Wei, Lin Jian, Gu Weibing B, et al. Preparation of flexible and stretchable circuit via printing method based on silver nanowires[J]. *Science in China (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2016, 46(4): 044611.
- [20] Yuan W, Gu W, Lin J, et al. Printed flexible and stretchable hybrid electronic systems for wearable applications[C]//IEEE, Electronic System-Integration Technology Conference. 2016: 1–4.
- [21] Yuan W, Gu W, Lin J, et al. Flexible and Stretchable Hybrid Electronics Systems for Wearable Applications[J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 668–671.
- [22] Xu F, Zhu Y. Highly conductive and stretchable silver nanowire conductors[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(37): 5117–5122.
- [23] 崔铮. 印刷电子学: 材料、技术及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
Cui Zheng. *Printed electronics: Materials, technologies and applications*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [24] Amjadi M, Pichitpajongkit A, Lee S, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(5): 5154–5163.

Fabrication of stretchable circuit with high resolution linewidth and complex pattern via printing method on silicone substrate

YUAN Wei, GU Weibing, LIN Jian, CUI Zheng

Printable Electronics Research Center, Suzhou Institute of Nanotech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China

Abstract Stretchable electronics have attracted much more attention in recent years due to their excellent conformability to non-planar objects and potential applications in wearable electronics, flexible display and bioengineering. In this work, a fast and efficient method has been developed for fabrication of stretchable electrodes with complex pattern by printing assisted vacuum filtration. The linewidth of the patterned Ag NWs electrodes is down to 50 μm , and the enlarged SEM image shows the Ag NWs line with well defined sharp edge. The microelectrode array on the silicon substrate has excellent uniformity of resistance, and the stretchable electrode is also very stable under repeated strain condition. It is shown that the resistance increases only 40% when the tensile strain is doubled. The buckling structure of Ag NWs/PDMS composite layer results in the resistance stability under strain condition. Also demonstrated is the stretchable lighting circuit integrated on textile for wearable application.

Keywords screen printing; vacuum filtration; silver nanowire; stretchable circuit; smart fabric

(责任编辑 田恬)