

特约专栏

印刷传感技术

裴为华¹, 国冬梅^{1,2,3}, 耿照新¹, 陈弘达¹

(1. 中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

(2. 石家庄铁道大学电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

(3. 石家庄信息工程职业学院印刷技术系, 河北 石家庄 050035)

摘要: 和硅基电子器件与印制电路板(PCB)相比, 印刷电子独特的制备工艺使得导线、有机或无机半导体、介质材料能够以更灵活的方式与衬底材料结合在一起, 特别是一些在力、热、光、电等方面有着特殊性质的材料。因此对于大多数旨在将非电信号转换为电信号的传感器而言, 印刷电子技术为这类传感器的制备提供了良好的工艺手段。另一方面, 印刷电子环保、大批量、低成本的制备方法也为快速增长的传感器需求提供了良好的解决方案。目前随着印刷电子技术在材料、制备工艺和配套设备方面的不断发展, 采用印刷方式制备的传感器的方法和类型不断推陈出新, 成为印刷电子一个重要的发展方向。对目前采用印刷电子技术制备或适合印刷制备的一些传感器, 特别是用于生物信号传感和分析的一些传感器的材料、功能特点及制备方法进行综述。旨在介绍印刷电子技术或者印刷制备方法在传感器研究和制备方面所存在的巨大潜力和良好的应用前景。

关键词: 印刷电子; 敏感元件; 传感器; 灵敏度; 印刷传感

中图分类号: TN41; TN43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)03-0172-06

Printed Sensor Technology

PEI Weihua¹, GUO Dongmei^{1,2,3}, GENG Zhaoxin¹, CHEN Hongda¹

(1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2. Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

(3. Department of Printing, Shijiazhuang Information Engineering Vocational College, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: Compared with silicon-based electronics and printed circuit board (PCB), printed electronics can combine conductive material, semiconductor, dielectric materials, as well as materials with special mechanical, thermal or optical aspects with substrate material in a more flexible method. For the sensors designed to convert non-electrical signals to electrical signals, printed electronics provides a good method to fabricate this kind of sensors. On the other hand, printed electronics technology is an environmental friendly, low cost, as well as mass productive, so it play a prospective role in the rapidly growing demands for sensors in the future. Now with the progresses in printable materials, fabrication process and equipment, sensors fabricated by printed electronics are sustaining innovation, printed sensors technology has become an important development direction. This paper recommends some sensors currently in printed electronic technology or suitable for printing preparation, especially reviews some sensor materials, functional characteristics and preparation methods for biological signal sensing and analysis. This paper aims to introduce the printed electronics or printing preparation method that have a great potential and good application prospect in sensor research and preparation.

Key words: printed electronics; sensitive element; sensor; sensitivity; printed sensors

1 前言

21 世纪是信息时代, 传感技术的发展程度直接影响着信息的来源和质量, 是信息技术中最为重要的一环。随着信息技术的进步和信息产业的发展, 传感器与传感技术在工业、交通、航天、勘探、医疗方面的应用越来越广泛, 越来越深入。传感与机械装置的结合, 实

收稿日期: 2014-02-17

基金项目: 国家 863 计划课题(2012AA030308, 2013AA032204), 国家自然科学基金(61335010, 61275200)

第一作者: 裴为华, 男, 1974 年生, 研究员, 博士生导师

通讯作者: 陈弘达, 男, 1960 年生, 研究员, 博士生导师,
Email: hdcchen@semi.ac.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.03.07

现了以电气化为代表的工业自动化;传感器与计算机相结合,形成了具有分析和综合判断能力的智能传感器;传感器与传感器相结合,形成了基于传感器阵列或多传感器的信息融合技术;传感器与医学的结合,使得便携式健康监护和远程医疗的设想正在一步步由愿景变为现实。

随着物联网、智能手机等新兴市场的出现,传感器的应用需求也越来越大、传感器的市场竞争也将日益激烈。新技术如云计算、大数据及数据融合技术的发展又进一步促进了对传感器数量和种类的需求,这些需求都将重新定义未来的传感器市场。无线传感器网络、智能传感器、纳米传感器,在体或植入式传感器等新型传感器市场份额将会越来越大。

面对如此庞大而又多变的未来市场需求,基于MEMS技术的传感器无疑会得到进一步的发展。但是,MEMS技术严苛的工艺要求所带来的产能和价格方面的限制使得传统的传感器很难适应未来这种无处不在的市场需求。印刷电子产品的最大特点与优势是大面积、低成本与柔性化。这一特点使得传感器的印刷制备具有产量大、成本低的优势,这种制造方式的特点非常符合未来传感器庞大的市场需求。和传统半导体及MEMS工艺常用的减法制备工艺不同,印刷电子制备使用的主要是加法工艺,因此印刷制备传感器还有环保、节能、材料利用效率高等优点。

利用印刷技术来研制传感器,是发展印刷电子技术的重要一环。印刷电子的初衷是研究和发展可以利用印刷技术制备的电子器件,抛开制造成本和制备方法,印刷电子产品的主要目标是取代部分硅基电子器件、发光显示器件或一些探测器件来制作开关、场效应管、PD、太阳能电池、LED或显示器,在研发印刷材料的过程中,一些非常适合做传感器的材料和器件逐渐被发现^[1-4]。尽管目前还很少有印刷电子材料制备的器件性能能和硅基电子器件一较高下,但利用传统电子器件标准考察性能还很难满足实际应用需求的材料,用来做传感器却有其他材料所不具备的一些特性。例如,基于有机电子的FET器件,目前多多少少还存在迁移率低、稳定性差,对环境敏感等问题,对于制备传统电子器件来说,为解决周围环境中的水汽及离子对有机FET的影响,需要对有机FET进行很好的封装。但利用有离子进入有机材料,可以大幅改变材料导电性这一特性制备电化学或离子敏感的传感器^[5-9],在对一些生物信号的检测和传感中,得到了较传统传感器更高的灵敏度和分辨率。2013年底Khodagholi. D等人在《Nature Communication》上首次报道了利用基于PEDOT:PSS材料制备的神

经信号传感器件,并成功进行了动物在体神经信号记录实验,这种传感器的所记录到神经信号的信噪比52.7 dB和传统的神经记录电极的信噪比(32.0 dB)相比,要高两个量级。

随着导电油墨材料、功能油墨材料、有机半导体及聚合物高分子材料等印刷电子所需的关键材料在性能与制备工艺方面的进步^[10-13],采用印刷方式制备传感器的方案越来越多,传感器的性能也不断得到改善和提高。本文将对目前采用印刷电子技术制备或适合印刷制备的一些传感器,特别是用于生物信号传感和分析的一些传感器的材料、功能特点及制备方法进行综述。旨在介绍印刷电子技术或者印刷制备方法在传感器研究和制备方面所存在的巨大潜力和良好的应用前景。

2 基于印刷薄膜物理特性的传感器

传感的本质是进行能量或信号转换,通常传感器的构成由敏感元件、放大转换电路、数据处理三大部分构成,如果敏感元件的输出是非电信号,为了数据处理的方便,一般都会在敏感元件和放大读出电路之间增加一个由非电信号向电信号转换的环节。实际上,许多传感的对象本身就是电信号,如电场、电流或电势。这样,传感器本身只要是导体形成的基本电学原件,通过接触或感应读取,就能够对这些电信号进行感知,如电极,可以直接用来检测生物电势或电化学信号。由于印刷电子具备不受基底限制的灵活制备工艺,赋予了电阻、电容、电感等这些传统电学器件更多的传感功能。以电阻为例,当将导电浆料印制在具有一定厚度的弹性材料上形成具有一定阻值的电阻时,当弹性基底受到应力引起应变时,印刷在弹性基底上的导电的阻抗特性将发生变化,通过检测电阻的变化值与产生应变及应力之间的对应关系,可以制备出压力或位置传感器。Bruno Andò等人报道了一种在PET基底上采用喷墨打印制备的应力传感器^[14],导电墨水采用的是导电银浆,所打印的线条宽度为200 μm ,厚度在1.9 μm 左右,封装好的传感器如图1所示。由于不需要任何掩模,这种传感器的制备方法非常简单,初步的测试结果表明,尽管应力检测的灵敏度不是很高,但在线性度、可重复性等方面的性能尚可。这样的应变传感器完全可以满足一些对精度要求不高的测试场合,如用于玩具或包装盒。Bing Sun等人通过优化调整基于聚乙烯氧化物(PEO)的固态聚合物电解质材料,在纸质的基底上印制了温度测量范围在20~60 $^{\circ}\text{C}$ 之间的温度传感器^[10]。对于一些本身具有光电效应的材料,如果有满足印刷制备条件的浆料,再结合电极的印刷制备,就可以形成印制的光电探测器,用

来进行光信号的传感。Jieun Koo 等人在石英基板上利用丝网印刷制备 ITO (氧化铟锡) 纳米微晶形成线圈^[15], 通过优化后处理工艺 (退火), 制备出了响应度可达 0.87 mA/W 的印刷 ITO 紫外光探测器。

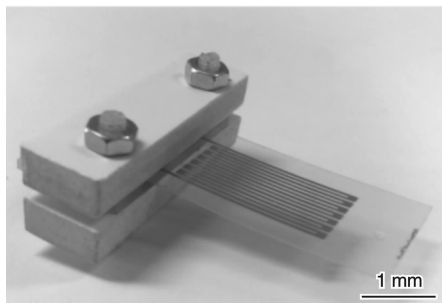


图 1 喷墨打印制备的应力传感器

Fig. 1 Stress sensor fabricated by inkjet printing

3 印刷电极/电化学传感器

电化学传感器是最适合使用印刷电子制备的一种传感器。即使在印刷电子这一概念没有出现之前, 使用丝网印制技术制备的电化学生物传感器件就已经引起了许多关注。1981 年, 一项专利文献报道了网版印刷技术应用于厚膜电化学传感器的制作, 引起了众多研究者的兴趣, 从此有关网版印刷生物传感器的报道越来越多。电化学传感器大多用来传感气体、生物或者化学信号, 传感器上的电极在使用过程中, 必须要和待测物品接触, 这样测试样品不可避免地会在电极表面造成沾污, 这样使用过一次以后, 其表面的清洗和恢复初始状态往往需要繁琐的工艺: 因为电极的表面一般会加载有如酶等这样的敏感物质, 清洗的力度必须适当, 既要保证沾污被清洗干净, 又要不损伤电极及其表面的敏感物质, 保持敏感物质的活性。这样一次性使用的电化学传感电极无疑是最好的选择, 印刷制备的电化学传感器正是这一要求的不二之选。使用印刷技术, 可以将银、碳颗粒、纳米碳管或其他金属粉末或颗粒制备的导电浆料通过印刷印制在廉价的衬底上, 目前广泛使用的葡萄糖电极就是其一。据国际糖尿病协会 (International Diabetes Federation) 统计, 2013 年, 全球糖尿病的患病人数是 3.82 亿, 仅血糖试纸一项, 据美国 IDtechEx 公司的市场分析报告, 每年的市场规模在 60 亿美元左右, 而且还有不断上升的势头。

随着人们生活水平的改善和提高, 对个人健康的关注也大大增加, 大量便捷且可靠的生物传感器需求量不断增加。与葡萄糖酶电极相类似, 印刷电子技术与目前生物芯片和试剂盒所经常使用加样技术——滴定, 具有非常好的工艺兼容性, 可以将生物制剂如酶、导电油

墨、选择性透过膜等其他材料通过印刷工艺, 一次性制备出修饰好生物敏感材料的电化学传感器。在电极材料方面, 印刷电子技术的发展, 使得用来制备电化学电极的材料有了更广泛的选择范围。石墨烯是近年来发展较快的一种材料, 作为一种纳米导电填料在印刷油墨材料中得到了广泛的应用, 鉴于石墨烯良好的电学特性和大的表体比, 可以在不增加电极几何尺寸的前提下, 大幅度增加电化学电极的有效表面积, 增加传感电极的灵敏度。ChanpenKaruwan 等人报道了一种采用丝网印制的一次性电化学传感电极^[16], 用来对 H_2O_2 、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸和铁氰化钾的浓度进行传感检测, 所制备的传感器如图 2 所示。

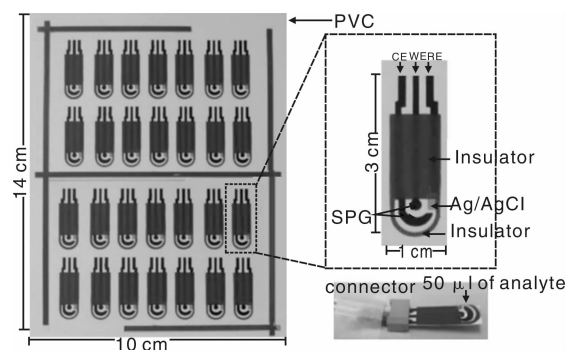


图 2 丝网印刷制备的一次性三电极电化学传感器

Fig. 2 A disposable screen printed three-electrode electrochemical sensor

与传统的碳糊电极相比, 在电极材料中掺入 10% 的石墨烯之后, 可以改善和提高印制电极的检测极限, 获得动态范围宽、稳定性好的印制电化学电极。

4 纸质生物生化传感器及微流传感

作为最为通用的印刷基底, 纸材料无疑是印刷电子最理想的材料之一, 主要的原因是: ①纸质材料无处不在; ②获取的方式简单; ③廉价; ④可以实现大规模加工, 便携。随着医疗健康产业的发展, 快速、简单、便宜的家用的诊断技术和检测方式倍受人们的青睐, 人们对这种基于纸质的微流体分析诊断传感器件的需求会逐步增长^[17-21]。通过设计与开发用于临床诊断的微流体纸质分析器件, 使用方便, 特别适合家用诊断、发展中国家或经济不发达的、边远的少数民族地区, 对我国少数民族地区的医疗健康水平提高有重要的推动作用。印刷制备技术无疑是满足这些需求最为适合的技术。继最早哈佛大学 whitesides 小组报道了低成本制作基于纸质材料的微流控分析器件之后^[19], 很多研究组开展了利用印刷、打印技术制备二维或三维纸质微流体分析器件研究^[18, 22-23], 常采用的印刷制备加工方法如表 1 所示。

表1 纸质微流体分析器件的加工方法

Table 1 The processing technology of paper-based microfluidic analysis devices

Processing technology	Substrate	Available equipment	Consumption of samples
Lithography	Paper chromatography	Photoetching machine	SU-8
PDMS printing	Filter paper	Desktop drawing machine	PDMS
Inkjet printer	Filter paper	Improved inkjet printer	Polystyrene
Wax printing	Filter paper or paper chromatography	Xerox Color Qube 8570, hot plate	Wax the ink cartridge
AKD Printing	Filter paper	Improved inkjet printer	AKD Solvent
Screen printing	Filter paper	Commercial screen printing plate	Solid wax
Flexible printing	Paper chromatography or clean paper	Commercial printer	Polystyrene
Wax impregnation technique	Filter paper	Commercial template, hot plate	Solid wax

综合利用打印、印刷技术及其后工艺技术可以制备一些基于纸质的微流控器件,如:微阀、混样器、样品分离器件、超声混样器件、液态电池、液态显示等器件、微流体计时与计量器件^[21-23]。图3列出了部分基于纸质材料制备的微流体器件。

纸质材料被作为柔性基底材料广泛应用于各种各样的器件中,如超级电容,电子器件,显示,微流体器件,相对传统的半导体器件而言,这类器件易于加工,价格低。基于纸质基底的传感器也被广泛地应用,如PH和气体传感器。正因为这种成功的应用,当前一些研究小组开始研究一些基于纸质基底的低成本金属纳米结构等离子体效应的SERS或LSPR传感器,等离子体共振效应的研究已开展很久了,但是研究者们关注金属纳米结构的等离子体共振的物理特性,及如何获得增强电磁场的等离子体效应器件,而没有关注这种基于

印刷技术的低成本传感器^[24]。这类纸质-金属纳米结构传感器件,首先是利用丝网印刷技术加工而成的,并用于了SERS检测,其中最为典型的SERS增强效应取决于在纸质基底上丝网印刷的次数,如图4所示^[25]。也可以在打印的浆料中混入银粉,根据需要打印或印刷出不同图案和大小的基于局域等离子体共振的纸质-等离子体共振传感器。

热变色显示技术的基本原理是电流通过导线后生热,其上的热变色墨水会改变颜色,如图5a所示^[26]。但这种显示技术需要电源供电。最早的一个无需电源的应用实例就是ABO RhD血型的文字和图案的显示(图5b)^[27],在纸质基底上用抗原标记出图案或文字,当血样滴上去后会发生血细胞凝集反应,而出现一些相应的图案或文字。最近,有报道利用纸质微流体显示技术检测过氧化氢,如图5c所示^[28]。

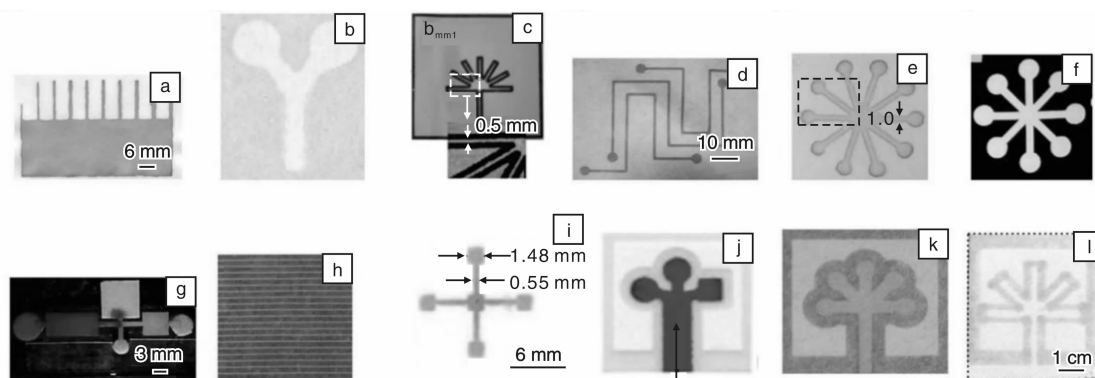


图3 各种纸质微流控分析器件: (a) 蜡丝网印刷制备的器件, (b) 浸蜡技术加工的器件, (c) 蜡打印制备的器件, (d) 烯酮二聚体打印制备的器件, (e) 弹性打印制备的器件, (f) 打印后利用电脑控制切割得到的器件, (g) 打印后 CO₂ 激光器切割得到的器件, (h) 打印后再利用激光处理获得的器件, (i) 喷墨打印机在纸上打印聚苯乙烯获得的器件, (j, k) 在色层分析纸上打印获得的器件, (l) 在滤纸上打印 PDMS 获得的器件

Fig. 3 A variety of paper microfluidic devices: (a) device fabricated by wax screen printer, (b) device fabricated by paraffin processing technology, (c) device fabricated by wax printing, (d) device fabricated by printed AKD, (e) device fabricated by flexible printing, (f) device fabricated by cutting with computer control, (g) device fabricated by CO₂ laser cutting after printing, (h) device fabricated by laser treatment after printing, (i) device fabricated by inkjet printing with polystyrene on paper, (j, k) device fabricated by printing on the chromatographic analysis paper, and (l) device fabricated by printing PDMS on filter paper

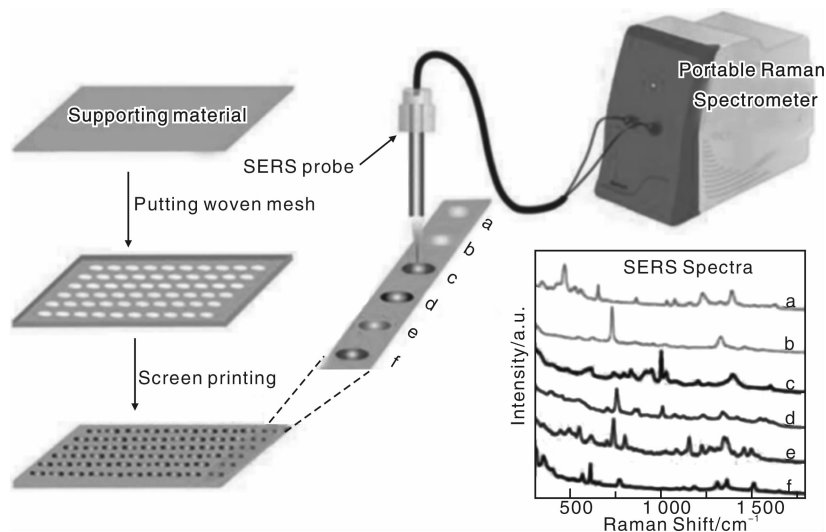


图 4 利用丝网印刷技术在纸质基底上制备的金纳米颗粒，并用于 SERS 传感检测过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of processes for gold nanoparticles fabricated by screen printing technology on paper substrate, and used for SERS sensing

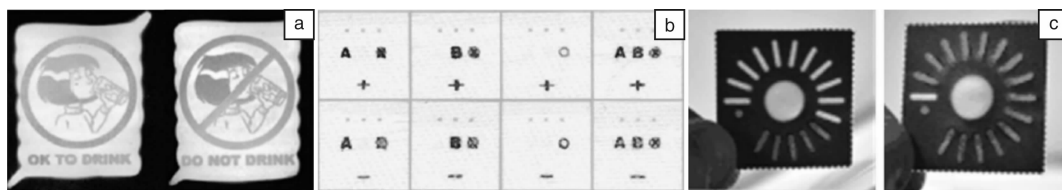


图 5 基于印刷技术的纸质微流体显示技术示意图：(a) 热变显示，颜色变化显示饮水安全与不安全，(b) 血样检测显示不同血型 (ABO, RhD)，(c) 无需外加设备在纸质微流体分析器件上过氧化氢浓度量化显示

Fig. 5 Schematic diagram of microfluidic display technology based on printing on paper; (a) thermal sensitive display, color difference shows safe and unsafe drinking water; (b) blood types test (ABO, RhD), and (c) concentration quantification analysis and display on paper based microfluidic device without additional equipment

5 3D 打印制备的传感器件

随着 3D 打印技术的发展和應用，印刷传感器件的维度不只停留在二维平面的形态，出现了一些可以处理和传感三维样品的执行器或传感器，如基于印刷或打印技术的 3D 纸质微流控分析器件。相对印刷制备的二维器件，同样尺度上，可以提供更多的检测或分析；可以使微流体在三维流动，实现多步骤分析。

3D 打印还可以形成具有更多维度运动的传感器件。J Parcell 等人报道了一种利用 PEDOT: PSS 材料打印制备的高宽比超过 100: 1 微纤毛阵列结构^[29]，如图 6 所示。利用这种纤毛良好的导电特性和弹性，成功制备出了印刷的气体流量传感器，由于印刷制备的方法可以非常方便地调节这种传感器的关键敏感元件，PEDOT: PSS 微纤毛的直径、长度及所处的位置，因此可以在很大的范围内调节传感器的灵敏度和测量范围，这种传感器的制备方法中，印刷电子制备技术灵活、便捷的特点非常突出。

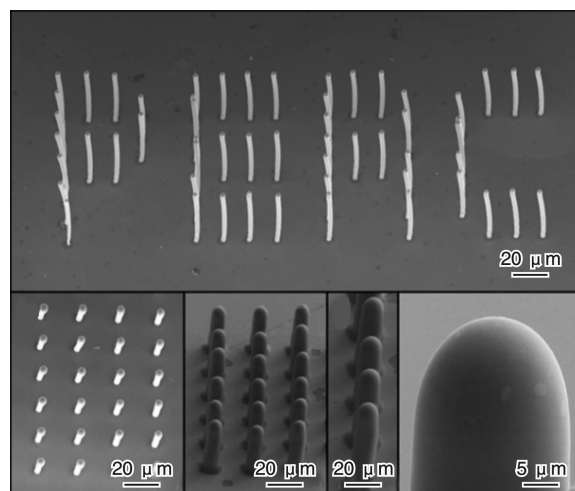


图 6 用于气体流量传感中印刷制备的 PEDOT: PSS 微纤毛阵列的 SEM 照片

Fig. 6 SEM micrographs of PEDOT: PSS micro cilia array fabricated by printing used for gas flow sensor

6 结 语

目前从技术发展来看, 印刷电子技术无论是在印刷油墨(或浆料)、印刷设备和印刷技术方面, 都处在一个快速发展的阶段, 各种新的印刷材料和工艺层出不穷。在导电油墨方面, 除了传统的银浆和碳基导电油墨, 基于铜、金和导电聚合物材料如 PEDOT: PSS 等材料的油墨也有了长足的发展, 一些功能材料如压敏、光敏、热敏等材料也发展出了适合印刷制备的材料。在可供印刷的基底方面, 除了具有柔性或可折叠功能之外, 具有弹性和可拉伸的柔性基底及相应的导电材料由于在可穿戴电子器件方面巨大的应用前景, 这些材料和技术也有了长足的发展。在印刷设备方面, 卷对卷(R2R)进行印刷制备是印刷电子追求的最理想的制备方法, 其中进行导电油墨、功能材料等图形涂覆的方法有喷墨打印、丝网印刷、凹版印刷等, 为了实现更细线条的制备, 更多的涂覆方法如超声雾化、静电纺丝、图形衬底等被研究和开发出来, 用于电子器件的印刷布线。在油墨材料的后处理方面, 除了传统的红外热处理或激光处理之外, 美国施乐(XEROX)公司开发了脉冲氙灯光固化系统, 可对印刷后的油墨进行快速、大面积的固化处理。这些材料、技术及设备的研究和开发为利用印刷技术制备电子器件或传感器件铺平了技术上的道路, 使得印刷传感即将成为一种可以大规模市场化的技术。

参考文献 References

- [1] Strakosas X, Sessolo M, Hama A, *et al.* A Facile Biofunctionalisation Route for Solution Processable Conducting Polymer Devices[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2014.
- [2] Stavrinidou E, Leleux P, Rajaona H, *et al.* A Simple Model for Ion Injection and Transport in Conducting Polymers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(24): 244 501.
- [3] Leleux P, Badier J M, Rivnay J, *et al.* Conducting Polymer Electrodes for Electroencephalography[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2013.
- [4] Stavrinidou E, Leleux P, Rajaona H, *et al.* Direct Measurement of Ion Mobility in A Conducting Polymer[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25: 4 488 - 4 493.
- [5] Khodagholy D, Rivnay J, Sessolo M, *et al.* High Transconductance Organic Electrochemical Transistors[J]. *Nature Communications*, 2013.
- [6] Khodagholy D, Doublet T, Quilichini P, *et al.* In Vivo Recordings of Brain Activity Using Organic Transistors[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1 575.
- [7] Spanu A, Lai S, Cosseddu P, *et al.* Organic FET Device as a Novel Sensor for Cell Bioelectrical and Metabolic Activity Recordings[C].//*Neural Engineering (NER)*, 2013 6th International IEEE/EMBS Conference on IEEE, 2013: 937 - 940.
- [8] Kim S H, Hong K, Xie W, *et al.* Electrolyte-Gated Transistors for Organic and Printed Electronics[J]. *Advanced Materials*, 2012, 25: 1 842 - 1 846.
- [9] Bongo M, Winther-Jensen O, Himmelberger S, *et al.* PEDOT: Gelatin Composites Mediate Brain Endothelial Cell Adhesion[J]. *J Mater Chem B*, 2013, 1: 3 860 - 3 867.
- [10] Sun B, Tehrani P, Robinson N D, *et al.* Tailoring the Conductivity of PEO-Based Electrolytes for Temperature-Sensitive Printed Electronics[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48: 5 756 - 5 767.
- [11] Wang X, Nilsson D, Norberg P. Printable Microfluidic Systems Using Pressure Sensitive Adhesive Material for Biosensing Devices[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 2013, 1830: 4 398 - 4 401.
- [12] Park H H. Simple Shielding Evaluation Method of Small Shield Cans on Printed Circuit Boards in Mobile Devices[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(15): 936 - 938.
- [13] Ihalainen P, Majumdar H, Määttänen A, *et al.* Versatile Characterization of Thiol-Functionalized Printed Metal Electrodes on Flexible Substrates for Cheap Diagnostic Applications[J]. *Biochimica Et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 2013, 1830: 4 391 - 4 397.
- [14] Ando B, Baglio S. All-Inkjet Printed Strain Sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(12): 4 874 - 4 879.
- [15] Koo J, Park S, Lee W, *et al.* High Performance Printed Ultraviolet-Sensors Based on Indium-Tin-Oxide Nanocrystals[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52(11R): 115 001.
- [16] Karuwan C, Wisitsoraat A, Phokharatkul D, *et al.* A Disposable Screen Printed Graphene-Carbon Paste Electrode and Its Application in Electrochemical Sensing[J]. *RSC Advances*, 2013, 3(48): 25 792 - 25 799.
- [17] Ali Kemal Y, Muhammad S A, Christopher R. Lowe, Paper-Based Microfluidic Point-of-Care Diagnostic Devices[J]. *Lab Chip*, 2013, 13: 2 210 - 2 251.
- [18] Devi D, Burkhard, Gooding J, *et al.* Recent Advances in Paper-Based Sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12: 11 505 - 11 526.
- [19] Martinez A W, Phillips S T, Carillho E, *et al.* Diagnostics for the Developing World: Microfluidic Paper-Based Analytical Devices[J]. *Anal Chem*, 2009, 82: 3 - 10.
- [20] Murilo Santhiago, Emilia W N, Glauco P S, *et al.* Microfluidic Paper-Based Devices for Bioanalytical Applications[J]. *Bioanalysis*, 2014, 6(1): 89 - 106.
- [21] Piotr Lisowski, Paweł K Z. Microfluidic Paper-Based Analytical Devices (IPADs) and Micro Total Analysis Systems (ITAS) [J]. *Development, Applications and Future Trends, Chroma-*

- tographia*, 2013, 76: 1 201 – 1 214.
- [22] Li X, Tian J F, Gil Garnier, *et al.* Fabrication of Paper-Based Microfluidic Sensors by Printing[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, 76: 564 – 570.
- [23] Li Xu, David R B, Shen W. A Perspctive on Paper-Based Microfluidics: Current Status and Future Trends[J]. *Biomicrofluidics*, 2012(6): 11 901.
- [24] Lakshminarayana P, Luis M. Towards Low-Cost Flexible Substrates for Nanoplasmonic Sensing[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2013, 15: 5 288 – 5 300.
- [25] Qu L L, Li D W, Xue J Q, *et al.* Batch Fabrication of Disposable Screen Printed SERS Arrays[J]. *Lab Chip*, 2012, 12 (5): 876 – 881.
- [26] Siegel A C, Phillips S T, Dickey M D, *et al.* Foldable Printed Circuit Boards on Paper Substrate[J]. *Adv Funct Mater*, 2010, 20: 28 – 35.
- [27] Sylwia M, Slawomir J, Piotr G. A Micro-Rheological Method for Determination of Blood Type[J]. *Lab Chip*, 2013, 13: 2 796 – 2 801.
- [28] Lewis G G, DiTucci M J, Phillips S T. Quantifying Analytes in Paper-Based Microfluidic Devices without Using External Electronic Readers[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2012, 51: 12 707 – 12 710.
- [29] Parcell J, Aydemir N, Devaraj H, *et al.* A Novel Air Flow Sensor from Printed PEDOT Micro-Hairs[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(11): 112 001.