

基于丝网印刷的触觉传感器研究综述

王一琳,赵佳锋,黄婧雯,温丫丁,王彦,张晓升*

(电子科技大学集成电路科学与工程学院,四川成都 611731)

摘要: 触觉传感器是一种模拟人类触觉感知能力的传感器,能够检测和量化物理接触时产生的机械刺激或热刺激,并将这些信息转化为电信号,使电子系统获得感知触摸的能力,在人机接口、机器人等领域中受到广泛关注.随着纳米技术、材料科学和信息技术的发展,触觉传感器在向着柔性化、小型化的方向发展以适应在复杂曲面和可动表面上的运用.丝网印刷作为一种成熟的平面图形化加工工艺已被广泛应用于柔性电子的加工过程中.由于具备材料选择灵活、加工成本低、生产速度快等特点,丝网印刷在推动触觉传感器大规模应用方面具有巨大的潜力.本文对基于丝网印刷的触觉传感器的研究现状与最新进展进行了综述,从“丝网印刷的作用”、“丝网印刷触觉传感器的原理”和“提高丝网印刷触觉传感器灵敏度的方法”三个方面进行了分析与归纳.通过对文献的综述,总结了基于丝网印刷的触觉传感器制造方法,并揭示了丝网印刷的优势.最后基于丝网印刷触觉传感器所面临的问题和挑战,对其未来发展方向进行了展望,为相关研究提供参考.

关键词: 触觉传感器;压力传感器;丝网印刷;印刷电子;电子皮肤;有源传感;无源传感

基金项目: 国家自然科学基金(No.62074029, No.61905035, No.61971108, No.62004029, No.51905554);国家重点研发计划(No.2022YFB3206100);四川省重点研发计划(No.2022JDTD0020, No.2020ZHC0038);四川省科技计划(No.2020JDJQ0036, No.2019YJ0198, No.2020YJ0015);四川省自然科学基金(No.2022NSFSC1941);中央高校基本科研业务费专项资金(No.ZYGX2019Z002)

中图分类号: TP212;TN605 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2025)01-0024-17

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240405

Review of Screen-Printed Tactile Sensors

WANG Yi-lin, ZHAO Jia-feng, HUANG Jing-wen, WEN Ya-ding, WANG Yan, ZHANG Xiao-sheng*

(School of Integrated Circuit Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: Tactile sensors are developed to mimic human tactile perception, they are able to detect and quantify mechanical or thermal stimuli generated during physical contact and convert the information into electrical signals, empowering electronic systems the ability to sense touch. So that tactile sensors have attracted significant attention in the fields of human-machine interface and robotics. With the development of nanotechnology, material science and information technology, tactile sensors advance to flexibility and miniaturization in order to adapt to the application on complex curved surfaces and movable surfaces. Screen printing, as a mature planar graphic process, has been widely used in the processing of flexible electronics. Due to the characteristics of flexible material selection, low processing cost and fast production speed, screen printing has great potential in promoting the large-scale application of tactile sensor. In this paper, we review the current research status and recent progress of screen-printed tactile sensors, from the aspects of “the role of screen-printing”, “the mechanism of screen-printed tactile sensors”, and “the methods to improve the sensitivity of screen-printed tactile sensors”. In the first aspect, the roles of screen printing are classified according to the function of the screen-printed part, including printing “conductive layer”, “active layer”, and “structural layer”. In the second aspect, the two types of sensing mechanisms, active and passive sensing, are summarized separately, which further demonstrates the compatibility of the screen-printing process. In the third aspect, four kinds of structures fabricated by screen printing are summarized to show the potential for high sensitivity of screen-printed tactile sensors. As a result of the review, the methods of tactile-sensor fabrication based on screen printing are summarized, and the advantages of screen printing are revealed. Finally, based on the

challenges faced by screen-printed tactile sensors, an outlook on the future direction of their development is given, to provide references for related research.

Key words: tactile sensor; pressure sensor; screen print; printed electronics; electronic skin; active sensing; passive sensing

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62074029, No.61905035, No.61971108, No.62004029, No.51905554); National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB3206100); Key Research and Development Program of Sichuan Province (No.2022JDTD0020, No.2020ZHCG0038); Sichuan Science and Technology Program (No.2020JDJQ0036, No.2019YJ0198, No.2020YJ0015); Natural Science Foundation of Sichuan Province (No.2022NSFSC1941); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.ZYGX2019Z002)

1 引言

触觉是人类皮肤的一项重要功能,是人类感知外界环境、与环境进行互动的重要渠道。在人类的皮肤中有专门对外部压力、弯曲、拉伸和温度变化等刺激做出响应的感受器,让人类能够识别接触到的物体。研究者们希望在电子系统中实现等同,甚至超过人类皮肤的触觉感知能力,于是提出了触觉传感器,使用与传统的压力传感器、温度传感器等类似的传感机理将外界刺激转化为电信号,实现对刺激的感知与量化。但不同的是,触觉传感器的关键在于对接触过程的特征检测,因此更着重于识别接触位置、接触面的形状、接触方向等信息,且触觉传感器多为阵列形式,包含多个传感单元,从而实现一定区域内的触觉感知。目前,研究者们已经基于多种转化机理开发出了不同类型的触觉传感器,常用的转化机理有阻变效应^[1-3]、容变效应^[4-6]、压电效应^[7-9]、热电效应^[10-12]、电磁感应原理^[13-15]、摩擦电效应^[16-18]等。触觉传感器能够为机器人和自动化系统提供触摸和力量感知能力,使其能够更好地感知和理解周围环境,从而实现更智能、更灵活地操作和交互。研究者认为,未来触觉传感器在机器人^[19-21]、智能假肢^[22-24]、人机接口^[25-27]、健康监测^[28-30]等领域中都会有广阔的应用前景。然而,目前触觉传感器在灵敏度、动态范围、空间分辨率方面的表现还与真实的皮肤有一定差距^[31],除此之外,传统的触觉传感器多为硬质结构或块体结构,难以安装在弯曲或柔软的表面,因此应用场景受到限制。

为解决触觉传感器的共形难题,研究者们对柔性的触觉传感器展开了研究,尝试通过光刻^[32,33]、3D打印^[34,35]、喷墨打印^[36,37]、丝网印刷等多种加工技术加工柔性传感器。其中,光刻适用于高分辨率、复杂平面图形的触觉传感器,能够实现精细的微米尺度乃至纳米尺度图案,工艺复杂度及成本仍有待进一步优化。3D打印适用于制造具有复杂立体结构的触觉传感器,能够快速进行原型制作,材料选择往往与工艺关联性较强。喷墨打印作为平面印刷技术之一,适用于大面积批量化的触觉传感器制备,无掩膜带来了高便捷的独特

优势,也使得多层集成制造时图形对准难度增大,且较厚材料层的实现仍具挑战性。而丝网印刷作为另一种平面印刷技术,同样展现了大面积批量化、高效率低成本的优势,能够沉积较厚的材料层,丝网掩膜的使用也使得多层对准更易于实现,但厚膜高精度印刷仍有待进一步提高。此外,丝网印刷对基底材料和印刷浆料的限制较少,不仅能够在硬质基板上印刷,也可以在柔性薄膜上印刷。印刷浆料中的功能填料可以是导电材料^[38,39]、压电材料^[40,41]、磁性材料^[42,43]、半导体材料^[44,45]等,因此平面印刷工艺能够实现多种功能、异质异构器件的加工,已被广泛应用于印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)^[46,47]、低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)^[48,49]、厚膜集成电路^[50,51]、太阳能电池^[52,53]等领域。同时,其具备成本低、可加工材料种类多、能够批量化大面积可控制造等优点,恰好适用于加工小型化、低成本的传感器器件,并且通过多层堆叠印刷以及阵列结构设计,可实现多类型传感器的三维集成与阵列集成,在多传感融合与传感器小型化的方向上具有巨大潜力。

本文将对基于丝网印刷实现的触觉传感器展开讨论,文章概要如图1所示。首先,从印刷导电组件、印刷功能组件^[54]和印刷全结构^[55]三个方面探究丝网印刷在触觉传感器加工过程中所发挥的作用。接着,对基于不同传感机理的传感器进行总结归纳,并阐述每种传感器的设计加工方法。然后,研究在丝网印刷的工艺流程中如何提高触觉传感器的灵敏度,列举了四种丝网印刷可以提高灵敏度的结构。最后,总结丝网印刷触觉传感器的技术难点并展望其发展方向。

2 丝网印刷在触觉传感器加工中的作用

触觉传感器作为一种将机械刺激或热刺激转化为电信号的电子器件,通常由三部分构成:导电组件、功能组件和结构组件。其中,导电组件包括电极和导线,负责器件内部的导电连接,并提供器件与外部电子系统的接口,实现电信号在内部的传导和向外的输出。功能组件是为传感器提供“感知”功能的部分,也是区分传感器种类的关键特征,它对外界刺激产生响应,表现

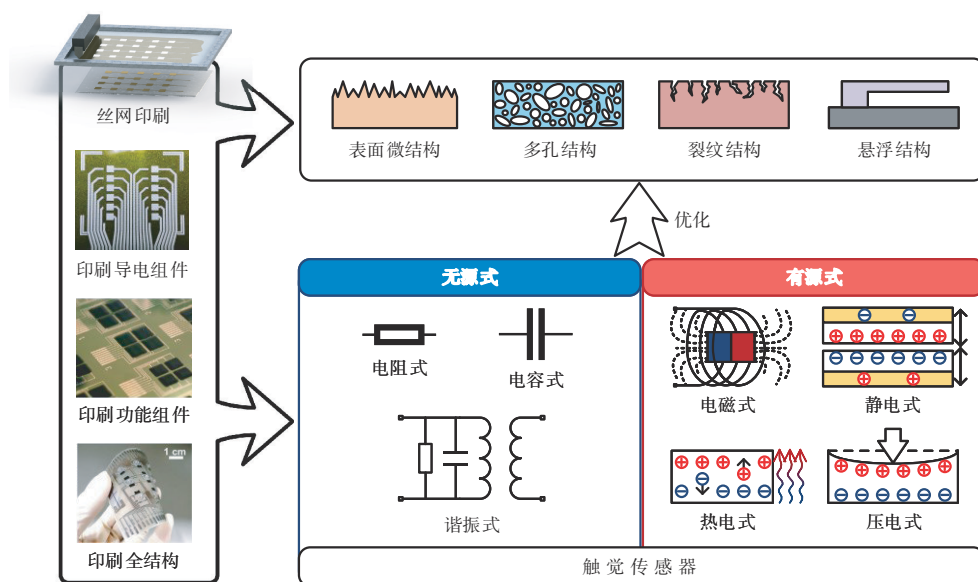


图1 基于丝网印刷的触觉传感器研究概述

为某一种或多种电学特征发生变化或输出电信号. 结构组件则是触觉传感器的框架, 确定器件的结构、将所有部分组成一个互相配合的整体. 在具体的案例中, 导电组件、功能组件和结构组件并不一定是分立的三个部分, 例如, 在某些器件中电极或导线也充当着功能组件的角色^[56].

触觉传感器的加工过程就是将具有不同特性的材料有机结合, 构成上述三种组件. 而丝网印刷是对浆料进行图案化加工, 使用含有适宜组份的浆料即可实现触觉传感器中各个组件的加工. 在实际的器件加工过程中, 需要根据器件的结构设计、待加工材料的特性等具体的加工需求, 确定器件的哪些部分使用丝网印刷进行加工. 在已有的工作中, 触觉传感器的导电组件^[57,58]、功能组件^[59,60]、结构组件^[61,62]都有通过丝网印刷加工的例子, 还有部分工作仅使用丝网印刷这一种加工工艺就实现了传感器中除基材外的所有组部件的加工. 因为丝网印刷以层为单位进行加工, 所以通过丝网印刷加工得到的部分结构通常被称为“电阻层”、“压电层”、“功能层”等.

2.1 丝网印刷导电组件

通过丝网印刷加工电极和导线所用的浆料被统称为导电油墨, 根据浆料中导电填料的种类可分为金属系导电油墨, 碳系导电油墨和有机高分子系导电油墨. 金属系导电油墨的导电填料是金、银、铜等金属的纳米颗粒或纳米线; 碳系导电油墨的导电填料包括碳黑、石墨烯、碳纳米管等碳材料; 有机高分子系导电油墨的导电填料是具有导电能力的高分子材料, 包括 PEDOT、聚乙炔、聚苯、聚吡咯、聚苯胺和聚噻吩等^[63]. 利用丝网印刷加工电极的效率、成本低、工艺简单, 已经广泛应

用于太阳能电池、低温共烧陶瓷、化学传感器的工业生产中. 因此, 在触觉传感器的加工过程中, 加工导电组件是丝网印刷最常见的作用.

图2(a)和图2(b)展示了两种利用丝网印刷加工导电组件的触觉传感器^[64,65]. 其中图2(a)中的工作是将银纳米颗粒导电油墨丝网印刷在柔性聚氨酯薄膜上作为柔性电极层, 两片柔性电极层之间夹着一层涂敷了离子凝胶的无纺布, 共同构成一种电容式传感结构. 当对该传感器施加压力时, 中间层会被压缩, 从而使传感器的电容增大. 互相垂直的上、下电极构成了 20×20 个传感单元, 能够检测力的分布情况, 空间分辨率达到了 $2 \text{ 点}/\text{mm}^2$. 得益于丝网印刷的大面积和低成本加工能力, 该器件的检测面积达到了 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, 单片的成本仅有1美元. 图2(b)所示的工作则是开发了一种石墨烯导电油墨, 并使用该油墨丝网印刷了一块柔性触摸板, 该器件由上、下两个电极层组成, 每个电极层包括构成电容的石墨烯电极和作为外部电路接口的银电极. 该触摸板也是一种电容式阵列传感器, 包含40列28行. 与图2(a)中由形变造成的电容变化不同, 此传感器的原理是导体(如人的手指)靠近上、下电极构成的电容时会影响附近的静电场, 从而使测量到的电容值变化.

2.2 丝网印刷功能组件

触觉传感器中功能组件的材料构成决定了传感器的类型和传感机制. 除了将导电组件同时作为功能组件的情况外, 对热刺激敏感的触觉传感器常采用热敏电阻材料或热电材料制作功能组件, 对机械刺激敏感的触觉传感器常采用压阻材料、压电材料或聚合物材料制作功能组件. 丝网印刷对加工材料的限制较少, 目



图2 丝网印刷在触觉传感器加工过程中的作用

前已有多种用于丝网印刷的功能浆料被开发出来,例如正温度系数(Positive Temperature Coefficient, PTC)油墨^[69]、热电油墨^[70]、压阻油墨^[71]、压电油墨^[72]等,因此,丝网印刷也常用于触觉传感器中功能组件的图案化加工。

Wen 等人^[66]分别用 $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ 和 Sb_2Te_3 配制了 N 型和 P 型热电油墨,并用这两种油墨在聚酰亚胺薄膜上丝网印刷,得到了一种双链式热电堆,如图 2(c) 所示。热电堆在受到环境中的热刺激后会产生电压输出,同时,当环境温度改变时热电堆的电阻会随之发生变化。因此,该热电器件适合作为温度敏感型触觉传感器。Ouyang 等人^[67]将碳黑/树脂的混合物作为功能材料印

刷在条纹电极上,并将两片相同的具有条纹结构的膜面对面组装,使两片膜上的条纹十字交叉,从而得到一块压阻传感器阵列,如图 2(d) 所示。该阵列的尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,其中包含 32×32 个传感单元,空间分辨率达 1.5 mm 。搭配后端处理电路,该传感器阵列实现了表面轮廓绘制和运动轨迹追踪。

2.3 丝网印刷全器件

在触觉传感器中,除了导电组件和功能组件能够用丝网印刷加工外,部分结构组件如绝缘层、垫片、支撑梁也可以利用丝网印刷进行加工。尽管丝网印刷是一种平面工艺,通过控制套印次数在一定程度上也能调整加工部件的高度。因此,通过设计器件结构、合理

分层、调整加工流程,可以实现触觉传感器中基材上的所有组件都使用丝网印刷完成加工,从而极大地提高加工效率、减少材料损耗。

丝网印刷全器件的加工方式分为两种,一种是将不同材料、不同结构在单独的基材上分别印刷,最后将各层进行组装;另一种是在同一基材上逐层印刷。在分别印刷最后组装的方法中,各部件可并行加工,各自的加工条件互不影响,但需要确保层与层之间具有可靠的结合方式,不同层上的导电组件需要通过触点、过孔等结构进行导电连接,因此该方法对封装技术有较高的要求。而在同一基材上逐层印刷的器件本身就具有较高的集成度和一致性,但这种方法对材料选型有着更严格的要求。首先是材料的兼容性,在已有的结构上继续印刷时,新增油墨中的溶剂可能会溶解已有结构,或新增材料会与已有材料发生反应,因此,选择材料或配制油墨时,应确保互相接触的材料可共存。再者,油墨的固化条件应在已有材料的可承受范围内,例如印刷某种热固化油墨时,应确保在该油墨的固化温度下,已经加工好的材料不会变形、变性。此外,还需要考虑材料间的亲和性,确保新增材料在接触面上有足够的附着力,避免在后续加工中脱落。

图2(e)所示的触觉传感器采用的是各个结构独立印刷后组装的加工方法。该器件具备三轴力传感和温度传感的功能,其中力传感和温度传感单元分别印刷在聚乙烯(PolyEthylene, PE)薄膜和聚对苯二甲酸乙二酯(PolyEthylene Terephthalate, PET)薄膜上,力传感单元由银纳米颗粒和碳纳米管混合物印刷而成,产生形变时电阻发生变化;温度传感单元由碳纳米管和PEDOT:PSS的混合物印刷得到,温度变化时电阻随之变化。该器件的封装方式是逐层黏合。一层聚酯胶带粘在载有力传感单元的PE薄膜底部,表面有柱体结构的聚二甲基硅氧烷(PolyDiMethylSiloxane, PDMS)薄膜通过一种双面胶粘在力传感单元表面,最后将载有温度传感单元的PET薄膜覆盖在PDMS膜表面。PDMS膜一方面起到了黏合PET膜和PE膜的作用,另一方面,器件表面的柱体探测切向力和法向力并将力传导至PE膜表面的应变传感器。在柱体底部有四个以90°夹角排列的应变传感器,根据柱体所受力的方向和大小,四个应变传感器会产生不同程度的电阻变化,从而实现三轴力的检测。图2(f)所示的触觉传感器则是将导电组件和功能组件分别印刷在两片基材上,并在导电组件上继续印刷一层垫片,该垫片属于结构组件,使电极和功能层保持一定距离,当传感器受到的压力逐渐增大,功能层与电极的接触面积随之增大,因此该传感器对微小力具有较高的灵敏度。

3 丝网印刷触觉传感器的传感原理

触觉传感器根据其传感原理可分为两大类:无源传感器和有源传感器。无源传感器不会产生能量输出,对环境刺激的响应体现在其固有特征的变化上,如阻抗和谐振频率的变化,信号读出需要依靠外接信号源。无源传感器包括电阻式传感器、电容式传感器和谐振式传感器等。有源传感器自身能够产生能量输出,其本身即是一个信号源,环境刺激直接表现在输出信号上,输出信号的幅度和频率即代表刺激的大小和频率。因此,有源传感器也是换能器,其原理包括各种能量转换原理,如电磁感应、摩擦起电、热电效应、压电效应等。两类触觉传感器的差异在于:无源式触觉传感器不仅具备检测环境变化过程的动态感知能力,还能具备检测所处稳定状态的稳态感知能力;而有源式触觉传感器仅具备动态感知的能力,但具有更强的抗干扰能力,并且其信号读取电路也更加简单。

3.1 无源式触觉传感器

基于丝网印刷的无源式触觉传感器的核心是通过丝网印刷在基材上构建的电容、电阻、电感等无源元件。电容的决定式为 $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$,其中 ϵ_r 是介电材料的相对介电常数, S 为电容极板的正对面积, d 为电容极板间的距离, k 为静电力常量。因此,影响电容值的因素包括相对介电常数 ϵ_r 、极板正对面积 S 和极板距离 d 。通常, ϵ_r 发生改变的情况有两种,一种是环境温度发生变化,另一种是介电层的物质构成发生改变。 S 主要受到切向力的影响, d 主要受到法向力的影响。电容式传感器的结构可分为两种,一种是三明治结构,上、下电极位于介电层的两侧,主要通过改变电极的正对面积和距离来改变电容值;另一种结构的电极位于介电层的同一侧,主要通过改变介电层的厚度或介电常数来改变电容值。图3(a)展示了一种基于丝网印刷的电容式触觉传感器^[73],其电容主体由丝网印刷的PEDOT:PSS电极和带有空腔的硅胶介电层组成。当传感器被挤压时,硅胶介电层被压缩,上下电极的距离减小,即式 $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$ 中的 d 减小,则电容 C 增大。实验结果显示,当压力达到20 kPa时,该器件的电容的增长值可达9.48%。介电层中的空腔不仅增强了传感器的形变程度和压力响应能力,而且使传感器具备了检测负压的能力。研究人员利用真空设备在传感器表面施加负压,由于空腔是封闭的,在气压差的影响下会发生扩张,使上下电极的距离增大,导致电容值减小,当压力达到-60 kPa时,电容的缩减值可达24.64%。

电阻式传感器的作用是将环境变化或刺激转变为电阻值的变化。根据条形电阻的计算式 $R = \frac{\rho d}{S}$ 可知,电

阻值的大小受到电阻率 ρ 、长度 d 和横截面积 S 的影响,相应地,电阻式传感器依靠这三个参数随环境的变化实现传感功能.其中电阻率主要受到温度影响,因此基于电阻率变化的传感器主要应用于温度响应.而长度和横截面积主要由传感器受力时的形变影响,对于具有规则形状的内部均匀填充的电阻材料,受力发生形变时,长度和横截面积发生改变从而电阻值改变;对于电接触面具有微结构或内部具有孔洞结构的电阻材料,受力发生形变时,不仅均匀填充部分会发生上述改变,而且电接触的面积也会改变,使传感器的电阻值产生更大程度的变化.图3(b)所示电阻式传感器的电阻层的电接触面就具有微结构^[74],该传感器是由两片印刷了相同结构的薄膜面对面组装构成,每一片薄膜都是先印刷银电极,随后在银电极上印刷聚氨酯/碳黑混合材料作为电阻层.由于聚氨酯/碳黑混合浆料的黏度较高,丝网印刷得到的电阻层表面具有网格状微结构.两片薄膜上的电阻层接触后,器件整体的电阻值由各电阻层自身的电阻和两个电阻层的接触电阻决定.在传感器受到压力时,两个电阻层接触面上的网格状结构会发生形变,使接触面积增大,即式 $R=\rho d/S$ 中的 S 增大,从而使传感器的阻值 R 降低,同时每个电阻层受力也会被压缩,使电阻层整体长度减小,即 d 也会减小,导致传感器阻值 R 进一步降低.研究者通过测量固定电压下流经传感器的电流来衡量传感器的灵敏度.在施加压力较小时(0~100 kPa),电流相对变化量以 5.205 kPa^{-1} 的增长率变大;在施加压力较大时(1 200~1 500 kPa),电流相对变化量以 0.63 kPa^{-1} 的增长率变大.证明在施加压力较小时,电阻大小由面积 S 和长度 d 同时影响,电阻值降低较快;而在施加压力较大时,面积 S 增长量较小,电阻大小主要由长度 d 影响,电阻值降低变慢.

谐振式传感器的作用是将环境变化或刺激转变为谐振器谐振频率的变化.基于丝网印刷的谐振式传感器主要是由印刷的电阻、电容、电感构成的RLC谐振器或LC谐振器.由环境引起的电容值^[75]、电阻值^[76]或电感值的变化会使谐振器的谐振频率发生偏移,通过测量谐振频率的变化可以推算出环境的变化量.谐振式传感器大多用于无线传感,谐振器中的电感线圈兼具天线的作用,接收端可以通过该电感线圈向传感器无线输能并读取谐振器的谐振信号.图3(c)展示了一种丝网印刷的谐振式压力传感器及配套的信号读出系统^[77].该传感器以静电纺丝的压电纤维薄膜为基材,在薄膜上印刷叉指电容,电纺纤维薄膜的蓬松结构容易受力压缩,使电容的容值发生变化.而电感印刷在贴在纤维薄膜表面的聚酰亚胺胶带上,避免受到压电纤维中电荷的影响.该工作中使用一种射频标签测量设备,

通过接收线圈读取谐振器的谐振频率.该RLC谐振器的谐振频率为 $f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2}$,其中, R 代表印刷线圈天线的电阻, L 和 C 分别代表平面天线线圈和叉指电容器的电感和电容.在不受力的状态下,谐振频率约为13.56 MHz,受到压力时,由电容变化带来的谐振频率变化量为1 200 Hz/kPa.

3.2 有源式触觉传感器

有源式传感器的本质是换能器,利用丝网印刷在基材表面加工换能器的结构或部件,器件受到环境刺激时能够产生有规律的电信号输出,即可作为有源式触觉传感器.图4(a)展示了一种模仿蜘蛛纤毛的触觉传感器^[78].该传感器由类纤毛结构和小磁铁构成,类纤毛结构是在PET薄膜表面印刷的单匝线圈,呈长条形,具有较好的柔性,在受到轻微的力扰动时会相对固定在下方的磁铁运动,使通过线圈的磁通量发生变化.根据电磁感应原理,线圈会产生感应电压,电压的大小、极性和频率即可反映出传感器受力的情况.实验表明,当纤毛结构向靠近磁铁的方向弯曲时,线圈输出峰值为 $-45.2 \mu\text{V}$ 的电压脉冲;当纤毛结构向远离磁铁的方向弯曲时,线圈输出峰值为 $8.2 \mu\text{V}$ 的电压脉冲.

摩擦起电效应在日常生活中十分常见,任意两种材料在摩擦过程中都会发生电荷转移,在两个摩擦材料的接触面的另一侧各覆盖一层电极,根据静电感应原理,电极上就会产生感应电荷,两电极之间就会产生电压输出.电压输出的幅度和频率反应出接触力的大小、接触面积和接触频率,因此可用于触觉传感器.此类器件构造简单,对材料几乎无限制,常用的材料包括塑料、橡胶、织物、金属等,皮肤也经常作为一种摩擦材料参与摩擦起电.图4(b)所示为一种基于摩擦起电和静电感应的触觉传感器^[79],该传感器由尼龙基材、碳纳米管电极和丝绸面料构成.在尼龙基材表面丝网印刷碳纳米管电极时使用的浆料是一种碳纳米管和聚氨酯的混合物,具有防水和耐洗的特性.当皮肤在最上层的丝绸面料表面摩擦时,电极上会产生感应电荷,将电极与外部回路相连即可得到关于触摸情况的检测信号.实验表明,该器件的输出电压峰值与接触频率、接触压力和环境湿度等因素均相关,因此,能够实现多种类型的触摸情况检测.此外,通过对电极结构进行设计,可以实现触摸轨迹的检测.

在热电材料中,载流子会沿着温度梯度的方向流动从而产生电流,该现象被称为热电效应,该效应能够探测到微弱的热刺激比如人的触摸,因此热电器件也可以用作触觉传感器.常见的热电材料有石墨^[80]、PEDOT:PSS^[81]、碳纳米管^[82]、硫族化物^[83]、碲化物^[84]等.在图4(c)所示的工作中,研究者制备了一种基于石

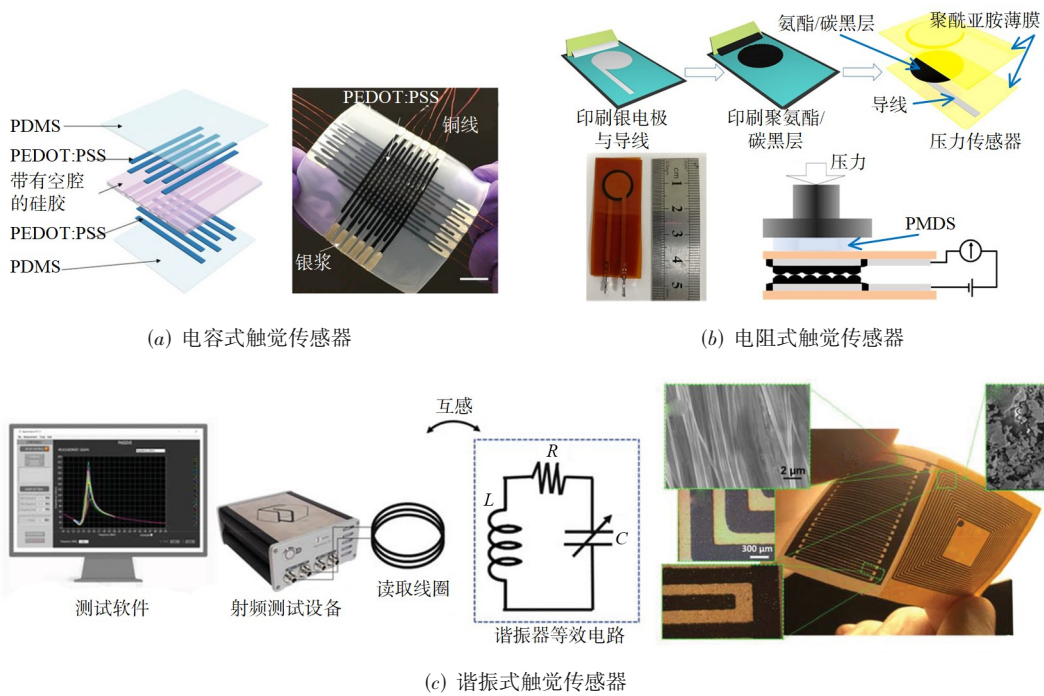


图3 丝网印刷的无源式触觉传感器

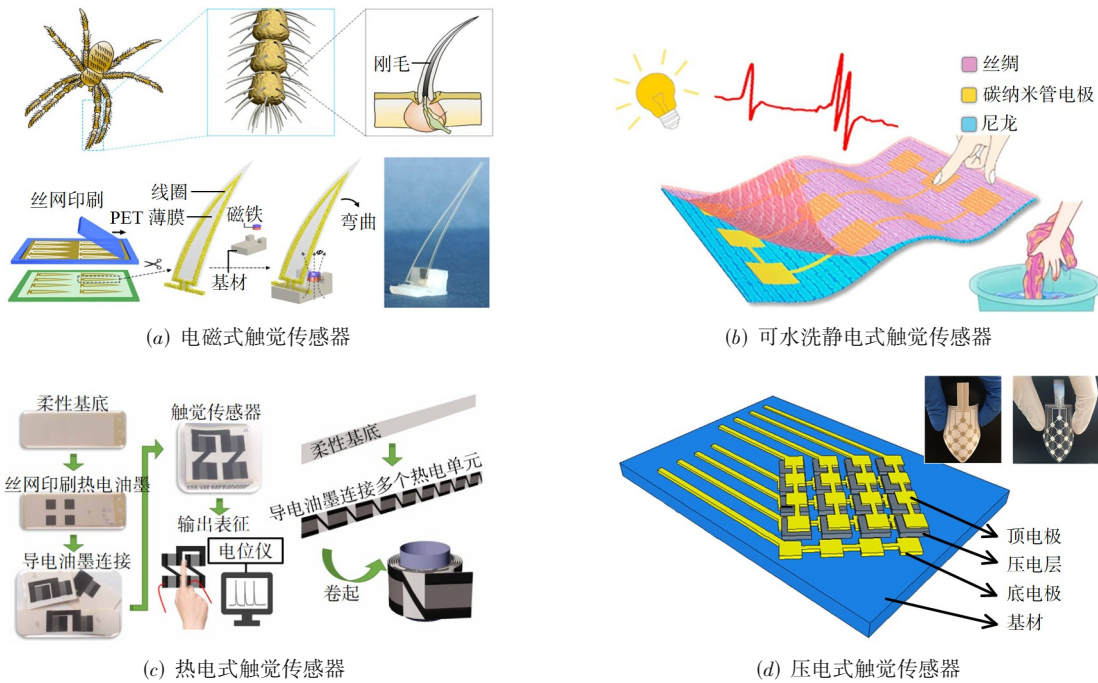


图4 丝网印刷的有源式触觉传感器

墨的热电油墨^[85],利用该油墨进行丝网印刷,加工了一种热触觉传感器,用手指触摸器件时,能够产生幅度为 $209 \mu\text{V}$ 的电压输出,通过检测输出电压的脉宽,可确定触摸时长. 研究者还使用导电碳浆印刷电极,将 16 个单元串联起来并卷成直径 7 mm 的圆柱,器件的输出电压超过了 4.5 mV ,从而提高了信噪比.

基于压电效应的传感器通常由两个平行电极和中间的压电材料组成,压电材料在受到外部压力发生形变时,材料内部产生极化现象,就会在材料的两端产生电压,电压的大小取决于材料的形变量,因此可以通过测量电压来检测施加压力的大小. 基于压电效应的触觉传感器具有优异的灵敏度和响应速度,适合于动

态压力检测,如振动检测、触摸检测和纹理表征.常见的压电材料有钛酸钡、钛酸锆、氧化锌、聚偏二氟乙烯(PolyVinylidene DiFluoride, PVDF)等,用这些材料的粉末可以制备适合丝网印刷的压电油墨^[86-89].其中PVDF具有柔韧性,常用于制备穿戴式柔性传感器.图4(d)所示为一种压电式触觉传感器阵列^[90],其加工流程是在基材上逐层印刷底电极、压电层和顶电极,其中印刷压电层使用的是一种以PVDF为主要材料的压电油墨.研究者分别尝试了使用纸和PET作为基材,得到的传感器分别具备1.2 V/N和0.3 V/N的灵敏度.

4 提高触觉传感器灵敏度的方法

灵敏度是触觉传感器的一项关键指标,它关乎触觉传感器的最小检测极限和分辨率,在微小力检测、纹理细节表征和精确测量的设计中需要着重考虑.触觉传感器的灵敏度用受到单位刺激时传感参数的相对变化量来表征,以电容式传感器为例,传感器的初始电容值为 C_0 ,在受到大小为 P 的压力时,电容值变化了 ΔC ,则该传感器的灵敏度为 $(\Delta C/C_0)/P$.由公式可得,当传感器受到固定的刺激时,其变化量越大则灵敏度越高.因此,可以通过优化结构设计和加工方法,加工出一些特殊结构来增大传感器受到刺激时的变化程度,从而提高传感器的灵敏度.对于基于丝网印刷的触觉传感器来说,易于实现的结构有表面微结构、多孔结构、裂纹结构、悬浮结构等.在设计传感器时,应根据其传感机理选择适宜的特殊结构,使影响传感输出量的结构变化得到增强.

4.1 表面微结构

在传感器的电极表面或与电极接触的介电层、电阻层表面加工微结构,实质上是增大了传感器受力时电接触面积的变化量.在初始状态下,仅有微结构顶端的微小面积与相邻部件发生接触,此时,微弱的力即可在接触面上产生较大的压强,使微结构或微结构接触的弹性体发生较大形变,使传感参数剧烈变化.当压力继续增大时,电接触面积也会随着微结构的塌缩而逐渐增大,相较于平整块体材料被压缩时仅有的厚度的变化,微结构同时在接触面积和厚度上的变化使其传感参数有着更大变化量.因此微结构使得触觉传感器对力尤其是微小力具有极高的灵敏度.

由于丝网印刷是使油墨透过网孔沉积在基材表面,若油墨流平性较弱,则会自然在表面形成网格状凹凸结构,研究者利用丝网印刷的这一特性加工出具有表面微结构的功能材料和电极.Xiao等人^[91]用聚氯乙烯和碳黑配制了一种丝网印刷浆料,该浆料被印刷在PET和乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(Ethylene-Vinyl Acetate copolymer, EVA)复合的薄膜上作为电阻层,与另一片

印刷有叉指电极的PET薄膜组合构成压力传感器,如图5(a)所示.丝网印刷的电阻层表面呈现出网格状凸起,凸起高度约5~15 μm ,宽高比约10:1.该传感器的总电阻值由两部分构成,一部分是电阻层自身的阻值,另一部分是电阻层与电极的接触电阻.向传感器施加压力时,一方面电阻层被压缩,内部的碳黑导电网络更加紧密,使电阻层的电阻值下降;另一方面,电阻层表面的凸起被挤压变形,使电阻层与电极的接触面积增大,接触电阻也会降低.这两种电阻降低的效应相叠加,使传感器的灵敏度达到了4.71 kPa^{-1} .

在图5(b)所示的工作中,研究者不仅使用丝网印刷加工出了表面粗糙的电极,还通过倒模法制备了表面具有微结构的介电层.介电层的材料为离子凝胶,它与电极的接触面积会极大地影响电容的容值,而粗糙的电极与表面有微结构的介电层的接触面积会随施加的压力剧烈变化,因此该传感器在0~200 kPa 的压强范围内具有高达2 593 kPa^{-1} 的灵敏度.丝网印刷具有一定的共形能力,在不平整的表面上也可以印刷出完整的图案,因此,可以用丝网印刷在微结构表面加工功能性涂层.Meng等人^[93]首先以砂纸为模板进行倒模,获得了具有表面微结构的PDMS膜,如图5(c)所示,随后在微结构的表面上印刷PEDOT:PSS油墨,使其表面具有导电能力,由于PEDOT:PSS具有热电效应,该PDMS膜还具有响应热刺激的能力.研究者将导电的微结构表面贴在另一片印刷有叉指电极的PET薄膜上,二者的接触面积会随压力发生改变,从而改变叉指电极间的电阻值.叉指电极与微结构导电表面的组合广泛应用于丝网印刷的触觉传感器中,这种结构易于加工,且能够有效提高传感器的灵敏度.

4.2 多孔结构

多孔结构的材料具有较小的压缩模量,在受到外力时更容易变形,更重要的是,材料内部的孔洞带来了巨大的内表面和填充空间.对于电阻材料来说,受到挤压时孔洞被压缩,内表面之间的接触面积增大,使材料内部的导电通路增多从而电阻减小.对于介电材料来说,压缩时孔洞内的空气被挤出,使介电材料整体的等效介电常数增大,使电容容值增加得更多.因此,无论是电容式传感器还是电阻式传感器,功能材料的多孔特性对传感参数的变化起到的都是增强的效果,发挥着提高传感器灵敏度的作用.在丝网印刷中,通过向油墨内添加发泡剂可以使印刷的材料在加热后呈现出多孔结构.

图5(d)所示的为一种丝网印刷的电容式触觉传感器,其中的介电层为多孔结构.研究者分别在三片PET薄膜上印刷了上层电极、下层电极和介电层.介电层的厚度约60 μm ,印刷介电层使用的浆料是添加了热膨胀

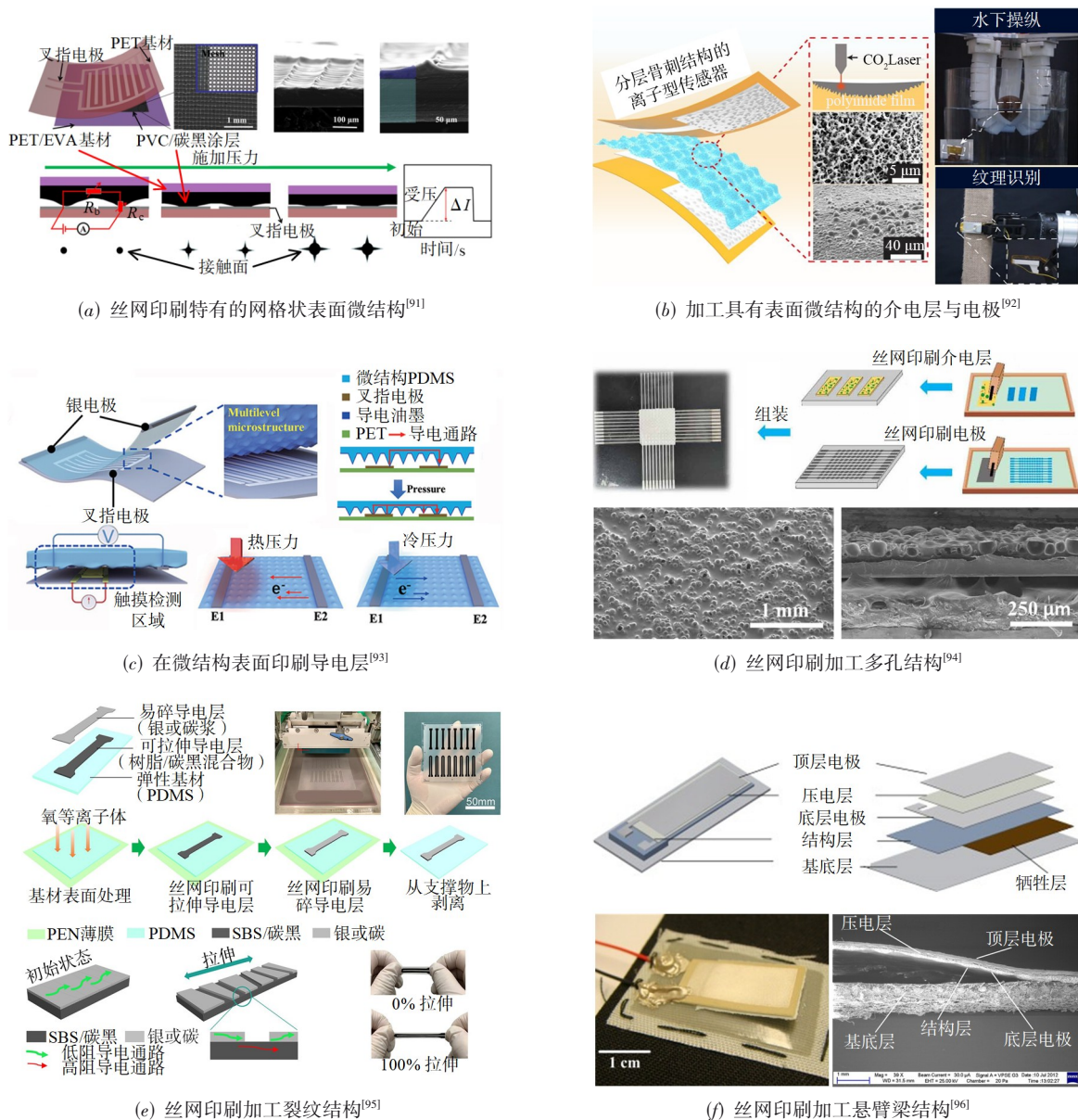


图5 在丝网印刷工艺中可采用的提高触觉传感器灵敏度的方法

颗粒和银纳米线的PDMS,在加热后,热膨胀颗粒会在介电层内部构建起多孔结构.将固化后的介电层从PET薄膜上剥离,夹在上、下电极之间,完成传感器的加工.研究者进行了对比试验,发现用纯PDMS作介电层的传感器在0~1 kPa内的灵敏度为 0.021 kPa^{-1} ,在1~10 kPa内的灵敏度为 0.0008 kPa^{-1} ;添加了1 wt.%热膨胀颗粒的PDMS作为介电层时,传感器在0~5 kPa的灵敏度提高到了 0.86 kPa^{-1} ,在5~10 kPa内的灵敏度提高到了 0.43 kPa^{-1} .

4.3 裂纹结构

裂纹结构通常应用于传感器的导电材料上.产生裂纹的导电材料通常为脆性导电薄膜,常见的构成材

料有金属纳米颗粒、金属纳米线、碳纳米管、石墨烯等.承载脆性导电薄膜的是弹性基材,弹性体受力时会在表面产生较大程度的应变,使导电薄膜破裂,破裂形成的碎片具有锯齿形的边缘.在传感器不受力时,碎片的边缘部分重叠、部分接触或保持一定间隙,将传感器的电阻维持在一个较小的值.当传感器在垂直于裂纹的方向上拉伸时,碎片之间的接触会被分开,导致导电通路减少,使传感器的电阻值急剧增大.当传感器的拉伸量逐渐减小时,碎片又会重新聚拢,使电阻值恢复.因此,裂纹结构能让触觉传感器拥有极高的灵敏度.

对于丝网印刷工艺来说,在弹性基材上印刷脆性导电材料,经拉伸后使表面导电薄膜碎裂即可获得裂

纹结构。但是,一旦导电材料的某处出现一条贯穿整个横截面的裂纹,处在电阻材料两端的电极就会突变为开路,无法响应更大程度的形变,这使得传感器的量程十分有限。为解决这一问题,Wang 等人^[95]先在 PDMS 弹性基材上印刷一层可拉伸的导电材料(树脂与碳黑的混合物),然后在可拉伸导电材料表面印刷脆性的导电材料如银浆或碳浆,如图 5(e) 所示。其中,可拉伸导电材料的导电性远低于脆性材料的导电性。如此一来,在没有拉伸时,导电层的电阻值由脆性导电材料的阻值决定,表现出较小的阻值。当传感器被拉伸时,脆性导电材料发生部分断裂,在断裂处,电流会从裂纹一边的脆性导电材料流经下方的可拉伸导电材料到达裂纹另一边的脆性导电材料,这会使导电层整体的阻值增加但不会开路。随着传感器的拉伸程度越来越大,脆性导电材料的断裂处越来越多,使可拉伸导电材料在电导中的占比越来越大,从而器件的整体电阻增大并逐渐接近可拉伸导电材料的电阻。因此,该器件在享有裂纹结构带来的高灵敏度的同时还兼具了很高的动态范围——在 0.05%~100% 的应变范围内,每 1% 的应变带来的电阻相对变化量高达 870%。

4.4 悬浮结构

丝网印刷是一种平面加工工艺,基于丝网印刷的传感器大多数为薄片状,这种外形的优势显而易见,即体积小、重量轻、有柔性、共形性好。但是“薄”也代表着传感器在厚度上的变化范围非常小,从而导致薄片状传感器相较于块状传感器在厚度方向上的灵敏度和动态范围的劣势。针对这一问题,研究者们尝试将传感器的功能组件悬浮在基材上方,为功能组件留出向下形变的空间,基于这种策略设计的结构包括悬臂梁^[97]、固端梁^[61]、空腔等^[55]。通过丝网印刷加工悬浮结构需要用到牺牲材料,在印刷悬浮结构之前先在下方印刷牺牲层,为印刷悬浮结构的油墨提供附着面,并作为悬浮结构的临时支撑。待整个结构加工完成且固化后,使用溶解、气化等方式将牺牲层去除即可得到悬浮结构。

图 5(f) 展示了一种悬臂梁结构的压电式触觉传感器,该器件完全通过丝网印刷加工制成。研究人员使用三羟甲基乙烷作为牺牲材料,这种材料会在 150 °C 的温度下完全升华为气体。首先,在基材表面印刷牺牲层,随后,使用一种光固化树脂在牺牲层上印刷悬臂梁主体,然后在悬臂梁上印刷电极和压电层,最后将器件在 160 °C 的烘箱中加热 30 min 使牺牲层完全去除。在牺牲层去除后,悬臂梁会由于表面应力向上翘曲,为压电层提供向下弯折的空间。

5 丝网印刷触觉传感器的现状与未来

表 1 中列举了部分基于丝网印刷的触觉传感器,对他们的材料和加工方法进行了总结,并对比了器件的灵敏度。

当前,基于丝网印刷的触觉传感器也存在着缺陷,主要在于器件的稳定性和一致性方面。在稳定性方面,丝网印刷的器件为逐层堆叠而成,不同材料在接合面上的粘附力有限,在切向力的作用下容易被剥落,且丝网印刷的材料层厚度一般在 5~20 μm 范围内,在长期使用中会被磨损,导致传感器性能下降或失效。在一致性方面,油墨黏度变化和基材不一致会导致印刷厚度不均,丝网网孔尺寸和网版张力变化也会影响印刷质量。刮刀压力不均和印刷速度不匹配会导致图案变形,而温度、湿度变化和污染物会进一步影响印刷的一致性。

为解决这些问题,提高触觉传感器的实用价值,在未来的研究中有以下几个方面值得关注,如图 6 所示。第一,材料及工艺优化。完善丝网印刷浆料体系,对印刷浆料进行特异性优化,开发满足不同场景需求的浆料如防水、耐高温、耐磨、高硬度、高韧度、可拉伸等;开发具备不同功能的浆料如导电浆料、压阻浆料、压电浆料、高介电常数浆料、绝缘浆料、磁性浆料等。同时,优化工艺参数和工艺步骤,探索最佳传感性能下的工艺参数,优化油墨配方和基材选择,定期更换和检查丝网,使用传感器调整刮刀压力,优化印刷速度,在大规模生产中,引入自动化监测系统,建立质量管理体系,减少加工误差确保器件一致性。此外,在设计中加入应力分散结构,如波浪形或蜂窝状图案,以减少应力集中,增加传感器的耐用性,采用高性能封装材料和技术,保护传感器免受环境影响,如湿度、温度变化和机械损伤。第二,多功能集成。利用丝网印刷的图层形状易控和印刷材料限制少的优势,通过印刷不同类型的功能材料,将应力、应变、温度、湿度等传感器或其他功能器件如超级电容,与电路全部印刷在同一基材上,开发具有多功能性的智能传感微系统,拓展其应用领域。第三,结合人工智能和机器学习算法,实现丝网印刷触觉传感器的智能化和自适应性,提高其对环境和使用条件的适应能力。

基于丝网印刷工艺设计并加工触觉传感器,一方面能够丰富触觉传感器的种类,扩大触觉传感器的适用范围,另一方面能够降低触觉传感器的成本,推动触觉传感器在商用领域的大范围应用。基于丝网印刷的触觉传感器凭借其轻薄、柔韧、可大规模低成本生产的特点,能够广泛地集成在电子系统中,为智能

表 1 基于丝网印刷的触觉传感器的类型与性能对比

传感器类型	印刷部分	印刷材料主要成分	特殊结构	灵敏度 (传感范围)	文献来源
电阻式	电阻层	碳纳米管	—	6.67 N ⁻¹ (法向力 0~2 N) 0.867 N ⁻¹ (切向力 0~0.5 N)	文献[54]
电阻式	电阻层	激光诱导石墨烯	—	1.7 kPa ⁻¹ (0~200 Pa) 0.259 kPa ⁻¹ (200~900 Pa) 0.008 kPa ⁻¹ (900~6 000 Pa)	文献[59]
电阻式	电阻层	碳黑	—	11.525 kPa ⁻¹ (0~100 kPa)	文献[66]
电阻式	电阻层,电极,垫片	碳纳米管,银,硅胶	—	15.1 V/N (0.04~0.15 N) 3.79 V/N (0.15~0.6 N) 0.528 V/N (0.6~1.3 N)	文献[67]
电阻式	电阻层,电极	碳黑,银	网格	5.2 kPa ⁻¹ (0~100 kPa) 0.63 kPa ⁻¹ (1 200 kPa~1 500 kPa)	文献[74]
电阻式	电阻层	PEDOT:PSS	不规则表面	134.25 kPa ⁻¹ (0~300 kPa)	文献[93]
电阻式	电阻层	银,碳黑	裂纹	8.7/1% 拉伸 (0~100% 拉伸)	文献[95]
电容式	电极	银	—	4.2 kPa ⁻¹ (0~400 Pa) 0.071 kPa ⁻¹ (4~30 kPa)	文献[57]
电容式	电极	银	—	27.11 kPa ⁻¹ (0~1200 Pa)	文献[63]
电容式	电极	PEDOT:PSS	空腔	0.30% kPa ⁻¹ (-60~-20 kPa) 0.56% kPa ⁻¹ (-20~0 kPa) 0.77% kPa ⁻¹ (0~10 kPa) 0.15% kPa ⁻¹ (10~20 kPa)	文献[73]
电容式	电极	银	不规则表面	17.2 kPa ⁻¹ (0~50 kPa) 2 593 kPa ⁻¹ (50~200 kPa) 837.3 kPa ⁻¹ (200~1 500 kPa) 389.7 kPa ⁻¹ (1 500~3 360 kPa)	文献[92]
电容式	介电层,电极	PDMS,银	多孔	0.86 kPa ⁻¹ (0~2 kPa) 0.43 kPa ⁻¹ (2~10 kPa) 0.018 kPa ⁻¹ (10~70 kPa)	文献[94]
电容式	电极	银	微锥阵列表面	0.098 kPa ⁻¹ (0~12 kPa) 0.004 kPa ⁻¹ (12~200 kPa)	文献[98]
电容式	电极	银	多孔	0.52% kPa ⁻¹ (0~20 kPa) 0.80% kPa ⁻¹ (50~200 kPa) 0.18% kPa ⁻¹ (300~900 kPa)	文献[99]
压电式	压电层,电极	PVDF,银	—	1.5 V/N (0.2~1.4 N)	文献[90]
压电式	电极	银	—	0.974 V/N (0.1~1 N)	文献[86]
压电式	压电层,电极	PVDF,PEDOT:PSS	—	1.1 mV/kPa (10~100 kPa)	文献[60]
静电式	电极	碳纳米管	—	0.047 9 kPa ⁻¹ (0~150 kPa) 0.018 6 kPa ⁻¹ (150~400 kPa) 0.003 3 kPa ⁻¹ (400~650 kPa)	文献[79]
静电式	电极	银	—	1.46 V/kPa (0.1~10 kPa)	文献[100]

穿戴设备提供丰富的环境感知功能,也可作为人机交互接口,为电子系统输入更加全面的人体姿态信息,实现更加灵活的操控方式,在虚拟现实(Virtual Reality, VR)和增强现实(Augmented Reality, AR)设备中提高用户体验和操作效率.在医疗健康领域,丝网印刷的触觉传感器允许使用生物相容性材料,确保传感

器的安全性和舒适性,并能以低成本大规模生产,可用于监测患者的生理参数、诊断疾病、康复治疗等方面,有助于提高医疗健康产业的水平和服务质量.总的来说,基于丝网印刷的触觉传感器在生产成本、灵活性、生产速度和材料兼容性等方面具有显著优势,这使得它们在智能穿戴设备、人机交互接口、医疗健

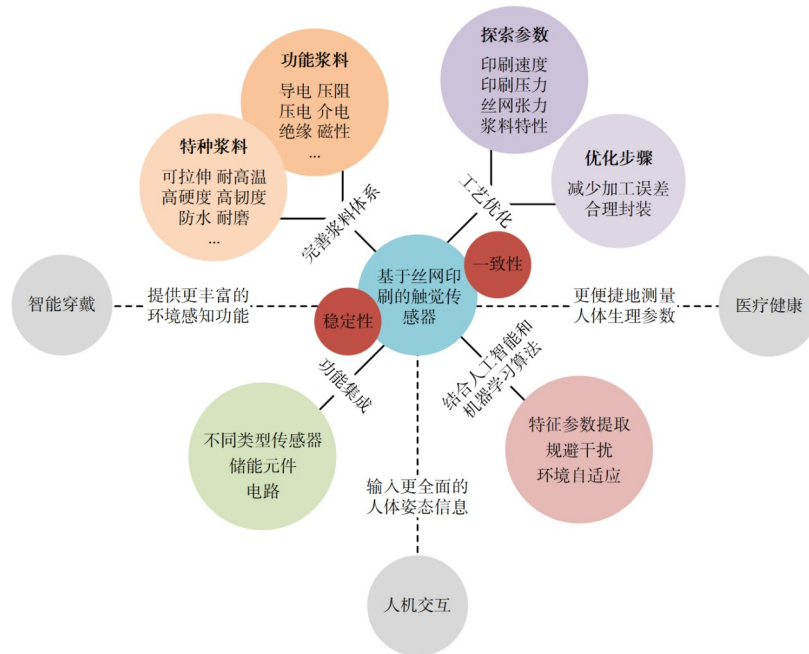


图6 基于丝网印刷的触觉传感器在现阶段存在的问题和未来的研究方向

康等应用场景中,能够提供高性能、低成本且适应性强的解决方案,推动相关领域的技术进步和广泛应用。

6 总结

本文结合文献分析对丝网印刷在触觉传感器加工过程中的应用进行了研究,首先归纳了丝网印刷在触觉传感器加工中发挥的作用,发现丝网印刷除了常见的印刷电极、导线,还可以印刷电阻、介电质等功能材料,甚至可以印刷维持器件结构完整性的组部件,实现全器件仅使用丝网印刷就可完成加工。随后总结了可用于丝网印刷的触觉传感器传感机理,根据所制传感器是否产生能量输出,将机理归为两类,分别是有源式传感和无源式传感,同时分析了不同种类传感器的设计和制造方法。此外,探究了提升触觉传感器灵敏度的方法,列举了四种丝网印刷可以实现的特殊结构——表面微结构、多孔结构、裂纹结构和悬浮结构。最后,对基于丝网印刷的触觉传感器的发展现状及现存问题进行了总结,针对这些问题提出了具体的解决途径,并对丝网印刷触觉传感器的发展方向进行了展望。

参考文献

- [1] XIE Y X, WU X H, HUANG X B, et al. A deep learning-enabled skin-inspired pressure sensor for complicated recognition tasks with ultralong life[J]. Research, 2023, 6: 0157.
- [2] ZHAO Z X, TANG J S, YUAN J, et al. Large-scale inte-

grated flexible tactile sensor array for sensitive smart robotic touch[J]. ACS Nano, 2022, 16(10): 16784-16795.

- [3] LONG Y, JIANG B, HUANG T C, et al. Super-stretchable, anti-freezing, anti-drying organogel ionic conductor for multi-mode flexible electronics[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(41): 2304625.
- [4] AFZAL U, ASLAM M, MARYAM K, et al. Fabrication and characterization of a highly sensitive and flexible tactile sensor based on indium zinc oxide (IZO) with imprecise data analysis[J]. ACS Omega, 2022, 7(36): 32569-32576.
- [5] AN B W, HEO S, JI S, et al. Transparent and flexible fingerprint sensor array with multiplexed detection of tactile pressure and skin temperature[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2458.
- [6] LV C Y, TIAN C C, JIANG J S, et al. Ultrasensitive linear capacitive pressure sensor with wrinkled microstructures for tactile perception[J]. Advanced Science, 2023, 10(14): 2370085.
- [7] WANG Z H, ZHAO Y W, JI J T, et al. A tactile skin based on the piezoelectric effect of PVDF and room temperature vulcanised silicone rubber[J]. Materials Technology, 2022, 37(12): 2123-2131.
- [8] HUYNH H Q, TRUNG T Q, BAG A, et al. Bio-inspired artificial fast-adaptive and slow-adaptive mechanoreceptors with synapse-like functions[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(42): 2303535.

- [9] LIN W K, WANG B, PENG G X, et al. Skin-inspired piezoelectric tactile sensor array with crosstalk-free Row+Column electrodes for spatiotemporally distinguishing diverse stimuli[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(3): 2002817.
- [10] YOON S I, KIM Y J. A flexible tactile sensor based on a thermoelectric device for simultaneous detection of contact heat and contact force[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(10): 105017.
- [11] ZHU P C, WANG Y L, WANG Y, et al. Flexible 3D architected piezo/thermoelectric bimodal tactile sensor array for E-skin application[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(39): 2001945.
- [12] GAO F L, MIN P, MA Q, et al. Multifunctional thermoelectric temperature sensor for noncontact information transfer and tactile sensing in human-machine interaction[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(1): 2309553.
- [13] DENG H T, WANG Z Y, WANG Y L, et al. Integrated hybrid sensing and microenergy for compact active microsystems[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, 8: 61.
- [14] ALFADHEL A, KOSEL J. Magnetic nanocomposite cilia tactile sensor[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(47): 7888-7892.
- [15] DAI H Z, ZHANG C Q, PAN C F, et al. Split-type magnetic soft tactile sensor with 3D force decoupling[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(11): 2470081.
- [16] FU X, DONG J N, LI L, et al. Fingerprint-inspired dual-mode pressure sensor for robotic static and dynamic perception[J]. *Nano Energy*, 2022, 103: 107788.
- [17] SU L, XIONG Q, WANG H Y, et al. Porous-structure-promoted tribo-induced high-performance self-powered tactile sensor toward remote human-machine interaction[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(32): 2203510.
- [18] XU J, SUN X, SUN B W, et al. Stretchable, adhesive, and bioinspired visual electronic skin with strain/temperature/pressure multimodal non-interference sensing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(28): 33774-33783.
- [19] LI S, CHEN X L, LI X M, et al. Bioinspired robot skin with mechanically gated electron channels for sliding tactile perception[J]. *Science Advances*, 2022, 8(48): eade0720.
- [20] LI G Z, LIU S Q, MAO Q, et al. Multifunctional electronic skins enable robots to safely and dexterously interact with human[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(11): 2104969.
- [21] LIU F Y, DESWAL S, CHRISTOU A, et al. Printed synaptic transistor-based electronic skin for robots to feel and learn[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(67): eabl7286.
- [22] WU Y Z, LIU Y W, ZHOU Y L, et al. A skin-inspired tactile sensor for smart prosthetics[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(22): eaat0429.
- [23] NÚÑEZ C G, NAVARAJ W T, POLAT E O, et al. Energy-autonomous, flexible, and transparent tactile skin[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(18): 1606287.
- [24] XUN X C, ZHANG Z, ZHAO X, et al. Highly robust and self-powered electronic skin based on tough conductive self-healing elastomer[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(7): 9066-9072.
- [25] VAGHASIYA J V, MAYORGA-MARTINEZ C C, VYSKOČIL J, et al. Black phosphorous-based human-machine communication interface[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2.
- [26] WEN F, SUN Z D, HE T, et al. Machine learning glove using self-powered conductive superhydrophobic triboelectric textile for gesture recognition in VR/AR applications[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(14): 2000261.
- [27] LIU Y C, LI H Y, LIANG X P, et al. Speech recognition using intelligent piezoresistive sensor based on polystyrene sphere microstructures[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(7): 2200427.
- [28] WANG Q, JIAN M Q, WANG C Y, et al. Carbonized silk nanofiber membrane for transparent and sensitive electronic skin[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(9): 1605657.
- [29] LEE G, BAE G Y, SON J H, et al. User-interactive therapeutic electronic skin based on stretchable thermochromic strain sensor[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(17): 2001184.
- [30] KIM J, CAMPBELL A S, DE ÁVILA B E, et al. Wearable biosensors for healthcare monitoring[J]. *Nature Biotechnology*, 2019, 37(4): 389-406.
- [31] PYO S, LEE J, BAE K, et al. Recent progress in flexible tactile sensors for human-interactive systems: From sensors to advanced applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(47): 2170373.
- [32] YANG R X, DUTTA A, LI B W, et al. Iontronic pressure sensor with high sensitivity over ultra-broad linear range enabled by laser-induced gradient micro-Pyramids[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2907.
- [33] HE J, ZHOU R H, ZHANG Y F, et al. Strain-insensitive

- self-powered tactile sensor arrays based on intrinsically stretchable and patternable ultrathin conformal wrinkled graphene-elastomer composite[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(10): 2107281.
- [34] GUO S Z, QIU K Y, MENG F B, et al. 3D printed stretchable tactile sensors[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27): 1701218.
- [35] ZHANG C, ZHENG H X, SUN J, et al. 3D printed, solid-state conductive ionoelastomer as a generic building block for tactile applications[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(2): 2105996.
- [36] YU Y, LI J H, SOLOMON S A, et al. All-printed soft human-machine interface for robotic physicochemical sensing[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(67): eabn0495.
- [37] DING Q F, CHEN H Y, WU J H, et al. Molding-free fully-printed flexible tactile sensors with performance-enhancing microstructures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(12): 11552-11561.
- [38] LI D D, LIU X, CHEN X, et al. A simple strategy towards highly conductive silver-nanowire inks for screen-printed flexible transparent conductive films and wearable energy-storage devices[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(8): 1900196.
- [39] HYUN W J, LIM S, AHN B Y, et al. Screen printing of highly loaded silver inks on plastic substrates using silicon stencils[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(23): 12619-12624.
- [40] WHITE A, MCKIBBEN N, DENG Z X. Additive manufacturing of piezoelectric force sensors[C]//*Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXIV*. SPIE, 2022: 342-349.
- [41] ALIQUÉ M, MOYA A, KREUZER M, et al. Controlled poling of a fully printed piezoelectric PVDF-TrFE device as a multifunctional platform with inkjet-printed silver electrodes[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(32): 11555-11564.
- [42] WANG R H, LUM J, CALLAWAY Z, et al. A label-free impedance immunosensor using screen-printed interdigitated electrodes and magnetic nanobeads for the detection of *E.coli* O157: H7[J]. *Biosensors*, 2015, 5(4): 791-803.
- [43] YÁÑEZ-SEDEÑO P, CAMPUZANO S, PINGARRÓN J M. Magnetic particles coupled to disposable screen printed transducers for electrochemical biosensing[J]. *Sensors*, 2016, 16(10): 1585.
- [44] DUAN S M, GAO X, WANG Y, et al. Scalable fabrication of highly crystalline organic semiconductor thin film by channel-restricted screen printing toward the low-cost fabrication of high-performance transistor arrays[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(16): 1807975.
- [45] KIM Y D, HONE J. Screen printing of 2D semiconductors[J]. *Nature*, 2017, 544(7649): 167-168.
- [46] 樊明国, 吴红. 基于UV膜的柔性微带电路丝网印刷工艺研究[J]. *电子工艺技术*, 2017, 38(4): 226-228.
- FAN M G, WU H. Screen printing technology of flexible microstrip circuit based on UV film[J]. *Electronics Process Technology*, 2017, 38(4): 226-228. (in Chinese)
- [47] 黄同科. 丝网印刷工艺在印制电路行业中的应用[J]. *网印工业*, 2013(3): 33-37.
- [48] PESQUERO N C, GONGORA-RUBIO M R, YAMANA-KA H. A novel LTCC electrochemical cell construction and characterization: A detection compartment for portable devices[J]. *The Analyst*, 2013, 138(15): 4298-4304.
- [49] MANJAKKAL L, SYNKIEWICZ B, ZARASKA K, et al. Development and characterization of miniaturized LTCC pH sensors with RuO₂ based sensing electrodes[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 223: 641-649.
- [50] WE J H, KIM S J, KIM G S, et al. Improvement of thermoelectric properties of screen-printed Bi₂Te₃ thick film by optimization of the annealing process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 552: 107-110.
- [51] YAO K, HE X J, XU Y, et al. Piezoelectric ceramic thick films deposited on silicon substrates by screen printing[C]//*Smart Structures and Materials 2004: Smart Electronics, MEMS, BioMEMS, and Nanotechnology*. SPIE, 2004: 108-113.
- [52] CHEN C S, CHEN J X, HAN H C, et al. Perovskite solar cells based on screen-printed thin films[J]. *Nature*, 2022, 612(7939): 266-271.
- [53] DENG M M, SUBRAMANIAN V. Screen-printable Cu-Ag core-shell nanoparticle paste for reduced silver usage in solar cells: Particle design, paste formulation, and process optimization[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(10): 4929-4935.
- [54] PYO S, LEE J I, KIM M O, et al. Development of a flexible three-axis tactile sensor based on screen-printed carbon nanotube-polymer composite[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(7): 075012.
- [55] HARADA S, KANAO K, YAMAMOTO Y, et al. Fully printed flexible fingerprint-like three-axis tactile and slip force and temperature sensors for artificial skin[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(12): 12851-12857.

- [56] GO M, QI X, MATTEINI P, et al. High resolution screen-printing of carbon black/carbon nanotube composite for stretchable and wearable strain sensor with controllable sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 332: 113098.
- [57] YANG W, LI N W, ZHAO S Y, et al. A breathable and screen-printed pressure sensor based on nanofiber membranes for electronic skins[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(2): 1700241.
- [58] MIZUSHIMA M, TAKAGI S, ITANO H, et al. Flexible and capacitive tactile sensor sheet[C]//2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP). Piscataway: IEEE, 2014: 756-759.
- [59] ZHAO J, ZHAO M, LI J Y, et al. Screen-printed all-in-one pressure sensor with integrated microsupercapacitor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(20): 25299-25306.
- [60] SEKINE T, GAITIS A, SATO J, et al. Low operating voltage and highly pressure-sensitive printed sensor for healthcare monitoring with analogic amplifier circuit[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019, 1(2): 246-252.
- [61] RAITERI D, SAALMINK M, BURGHORN M, et al. Fully-printed stretchable pressure sensor arrays[C]//2019 IEEE SENSORS. Piscataway: IEEE, 2019: 1-4.
- [62] DEBÉDA H, LUCAT C. Modified standard screen-printing technology for processing of free-standing physical and chemical sensors[C]//IEEE SENSORS 2014 Proceedings. Piscataway: IEEE, 2014: 2097-2100.
- [63] 于振坤, 张玉红. 导电油墨的研究进展[J]. *胶体与聚合物*, 2021, 39(2): 80-84.
YU Z K, ZHANG Y H. Research progress of conductive ink[J]. *Chinese Journal of Colloid & Polymer*, 2021, 39(2): 80-84. (in Chinese)
- [64] LIU J X, WANG M F, WANG P, et al. Cost-efficient flexible supercapacitive tactile sensor with superior sensitivity and high spatial resolution for human-robot interaction[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 64836-64845.
- [65] FRANCO M, CORREIA V, MARQUES P, et al. Environmentally friendly graphene-based conductive inks for multitouch capacitive sensing surfaces[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(18): 2100578.
- [66] WEN D L, DENG H T, LIU X, et al. Wearable multi-sensing double-chain thermoelectric generator[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2020, 6(1): 68.
- [67] OUYANG Q Q, YAO C J, CHEN H H, et al. Machine learning-coupled tactile recognition with high spatiotemporal resolution based on cross-stripped nanocarbon piezoresistive sensor array[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, 246: 115873.
- [68] AUBEELUCK D A, FORBRIGGER C, TAROMSARI S M, et al. Screen-printed resistive tactile sensor for monitoring tissue interaction forces on a surgical magnetic microgripper[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(28): 34008-34022.
- [69] WYZKIEWICZ I, GRABOWSKA I, CHUDY M, et al. Self-regulating heater for microfluidic reactors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 114(2): 893-896.
- [70] VARGHESE T, DUN C C, KEMPF N, et al. Flexible thermoelectric devices of ultrahigh power factor by scalable printing and interface engineering[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(5): 1905796.
- [71] WU H, XIE Y M, MA Y N, et al. Aqueous MXene/xanthan gum hybrid inks for screen-printing electromagnetic shielding, joule heater, and piezoresistive sensor[J]. *Small*, 2022, 18(16): 2107087.
- [72] MCGINN C K, KAM K A, LAURILA M M, et al. Formulation, printing, and poling method for piezoelectric films based on PVDF-TrFE[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(22): 225304.
- [73] SHI H Y, AL-RUBAIAI M, HOLBROOK C M, et al. Screen-printed soft capacitive sensors for spatial mapping of both positive and negative pressures[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(23): 1809116.
- [74] JIANG S W, YU J T, XIAO Y, et al. Ultrawide sensing range and highly sensitive flexible pressure sensor based on a percolative thin film with a knoll-like microstructured surface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(22): 20500-20508.
- [75] TAN Q L, YANG M L, LUO T, et al. A novel interdigital capacitor pressure sensor based on LTCC technology[J]. *Journal of Sensors*, 2014, 2014(1): 431503.
- [76] ALBRECHT A, SALMERON J F, BECHERER M, et al. Screen-printed chipless wireless temperature sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(24): 12011-12015.
- [77] NIKBAKHTNASRABADI F, HOSSEINI E S, DERVIN S, et al. Smart bandage with inductor-capacitor resonant tank based printed wireless pressure sensor on electropun poly-L-lactide nanofibers[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2022, 8(7): 2101348.
- [78] WU Z H, AI J W, MA Z, et al. Flexible out-of-plane wind sensors with a self-powered feature inspired by fine hairs

- of the spider[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(47): 44865-44873.
- [79] CAO R, PU X J, DU X Y, et al. Screen-printed washable electronic textiles as self-powered touch/gesture tribo-sensors for intelligent human-machine interaction[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(6): 5190-5196.
- [80] ZHANG D, ZHANG K W, WANG Y M, et al. Thermo-electric effect induced electricity in stretchable graphene-polymer nanocomposites for ultrasensitive self-powered strain sensor system[J]. *Nano Energy*, 2019, 56: 25-32.
- [81] KIM G H, SHAO L, ZHANG K, et al. Engineered doping of organic semiconductors for enhanced thermoelectric efficiency[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(8): 719-723.
- [82] ZHOU W B, FAN Q X, ZHANG Q, et al. High-performance and compact-designed flexible thermoelectric modules enabled by a reticulate carbon nanotube architecture[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 14886.
- [83] BYEON D, SOBOTA R, DELIME-CODRIN K, et al. Discovery of colossal seebeck effect in metallic Cu_2Se [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 72.
- [84] VENKATASUBRAMANIAN R, SIIVOLA E, COLPITTS T, et al. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit[J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 597-602.
- [85] FIGUEIRA J, BONITO R M, CARVALHO J T, et al. Screen-printed, flexible, and eco-friendly thermoelectric touch sensors based on ethyl cellulose and graphite flakes inks[J]. *Flexible and Printed Electronics*, 2023, 8(2): 025001.
- [86] ZHANG Y F, LU G P, CHEN M, et al. Flexible self-powered tactile sensors based on hydrothermally grown ZnO nanorods [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 12613-12621.
- [87] GONÇALVES S, SERRADO-NUNES J, OLIVEIRA J, et al. Environmentally friendly printable piezoelectric inks and their application in the development of all-printed touch screens[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019, 1(8): 1678-1687.
- [88] DEBÉDA H, LUCAT C, POMMIER-BUDINGER V. Printed piezoelectric materials for vibration-based damage detection[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 168: 708-712.
- [89] MONROE M M, GUILLERMO VILLANUEVA L, BRIAND D. Low-temperature processing of screen-printed piezoelectric KNbO_3 with integration onto biodegradable paper substrates: 1[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9: 19.
- [90] EMAMIAN S, NARAKATHU B B, CHLAIHAWI A A, et al. Screen printing of flexible piezoelectric based device on polyethylene terephthalate (PET) and paper for touch and force sensing applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 263: 639-647.
- [91] XIAO Y, JIANG S W, LIU P, et al. Highly sensitive and stable printed pressure sensor with microstructured grid arrays[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(10): 105027.
- [92] CHEN Z, ZHANG Y, ZHU B, et al. Laser-sculptured hierarchical spinous structures for ultra-high-sensitivity ion-tronic sensors with a broad operation range[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(17): 19672-19682.
- [93] MENG X Y, MO L X, HAN S B, et al. Pressure-temperature dual-parameter flexible sensors based on conformal printing of conducting polymer PEDOT:PSS on microstructured substrate[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2023, 10(5): 2201927.
- [94] MO L X, MENG X Y, ZHAO J, et al. Full printed flexible pressure sensor based on microcapsule controllable structure and composite dielectrics[J]. *Flexible and Printed Electronics*, 2021, 6(1): 014001.
- [95] WANG Y F, SEKINE T, TAKEDA Y, et al. Printed strain sensor with high sensitivity and wide working range using a novel brittle-stretchable conductive network[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(31): 35282-35290.
- [96] WEI Y, TORAH R, YANG K, et al. A screen printable sacrificial fabrication process to realise a cantilever on fabric using a piezoelectric layer to detect motion for wearable applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 203: 241-248.
- [97] LAKHMI R, DEBEDA H, DUFOUR I, et al. Force sensors based on screen-printed cantilevers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(6): 1133-1137.
- [98] QIN Y X, XU H C, LI S Y, et al. Dual-mode flexible capacitive sensor for proximity-tactile interface and wireless perception[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(11): 10446-10453.
- [99] MASIHI S, ATASHBAR M Z, PANAHI M, et al. A novel printed fabric based porous capacitive pressure sensor for flexible electronic applications[C]//2019 IEEE SENSORS. Piscataway: IEEE, 2019: 1-4.
- [100] RA Y, LA M, CHO S, et al. Scalable batch fabrication of flexible, transparent and self-triggered tactile sensor array based on triboelectric effect[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2021, 8(2): 519-531.

作者简介



王一琳 男,1998年5月出生于河南省驻马店市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院博士研究生.主要研究方向为印刷电子器件与传感微系统.

E-mail: wangyl@std.uestc.edu.cn



赵佳锋 男,2000年1月出生于四川省乐山市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院硕士研究生.主要研究方向为柔性传感器.

E-mail: 202222021819@std.uestc.edu.cn



黄婧雯 女,2001年2月出生于河南省信阳市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院硕士研究生.主要研究方向为热电微纳能源采集.

E-mail: jingwen_huang2024@163.com



温丫丁 女,2000年8月出生于四川省广元市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院硕士研究生.主要研究方向为柔性传感器.

E-mail: 847344874@qq.com



王彦 女,1986年3月出生于四川省成都市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院副教授.主要研究方向为柔性器件制备及微纳互连.

E-mail: wangyanzju@uestc.edu.cn



张晓升 男,1984年10月出生于安徽省宿州市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院教授、博士生导师.主要研究方向为智能微纳电路与微系统集成.中国电子学会会员编号: E190014289S.

E-mail: zhangxs@uestc.edu.cn