

## 柔性电子材料与器件的应用

于翠屏, 刘元安, 李杨柳, 郭霞  
(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

**摘要:** 新型柔性电子材料与器件从提出、发现、实现到应用, 在近 10 年内得到迅速发展, 其强可折叠性、多能力复合结构等特性对未来信息技术发展和系统应用的影响巨大。对比了两种主流的柔性实现方式, 即材料引入柔性和结构引入柔性, 分析了国内外相关领域的研究进展, 包括基础结构、工艺和潜在应用方向, 总结了目前面临的技术难题。依据基础研究现状, 未来柔性电子器件将会有成熟的应用技术创新成果, 形成新的可穿戴通信、可穿戴计算、分布式能源、环境感应、共形显示设备和装置。

**关键词:** 柔性电子; 可穿戴设备; 电子器件; 柔性材料

**中图分类号:** TN05

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00125

## Application of flexible electronic materials and devices

YU Cuiping, LIU Yuanan, LI Yangliu, GUO Xia

School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** New flexible electronic materials and devices have been developed rapidly in nearly a decade from the proposition, discovery, implementation to application. The impact of its strong fold ability and multi-capacity composite structures to technological development and system applications will be enormous. Two mainstream flexible implementation methods were compared: the material-induced flexibility and the structure-induced flexibility. The research progress of domestic and international in related fields was analyzed, including infrastructure, process and potential application directions, and the technical problems faced were summarized. According to the basic research status, flexible electronic devices will have mature application technology innovations achievements in the next few years, new and unprecedented wearable communication, wearable computing, distributed energy, environmental sensing, conformal display devices and devices will be formed.

**Key words:** flexible electronic, wearable device, electronic device, flexible material

### 1 引言

柔性电子<sup>[1]</sup>主要是指器件、电路、基底和功能系统具备可弯曲、可折叠和可延展等特性的新兴电子技术, 柔软如动物皮肤。与建立在坚硬基底上的传统硅基电子技术相比, 虽然在器件结构、组成材料和系统功能等方面区别较大, 但是柔性电子系统却可以与传统硅基电子系统进行无缝网络连接。随着世界信息化、生产数字化、生活智能化以及监护日常化的发展, 电子产品的人性化、个性化至关重

要, 而由柔性显示、柔性传感、柔性存储、柔性发光和柔性探测等需求带来的更加符合工程应用对象复杂结构界面需要的新特征, 必将给电子信息产业带来革命性变化。近年来, 柔性电子器件的应用以惊人的速度增长, IDTechEx 预测, 到 2028 年柔性电子产业规模将达 3 010 亿美元<sup>[2]</sup>, 是当今世界有发展前景的信息技术之一。柔性电子备受多国重视, 美国在 2012 年总统报告中将柔性电子作为先进制造 11 个优先发展方向之一; 英国在 2010 年新经济发展战略“建设英国未来”中将柔性电子作为

先进制造领域的首要发展方向；日本在 2011 年成立先进印刷电子技术研究联盟，重点发展印刷及薄膜技术。

柔性电子概念可以追溯到 1923 年，Seymour 利用石墨糊印刷制作了一台柔性无线电调谐器。随后，艾伦·黑格、马克迪尔米德和日本科学家白川英树发现导电聚合物可穿戴电子材料，这是柔性电子得到广泛重视的关键，该成果于 2000 年获得诺贝尔化学奖。2013 年，Google、美国国防高级研究计划局、美国陆军通信电子司令部和美国国家航空航天局等明确提出了可穿戴电子器件概念。资本实验室在“2013 年硬件创新与趋势报告”中发表了可穿戴技术篇，使柔性可穿戴电子进入了民众视线。高通公司、ARM 公司和英特尔等电子巨头迅速开展了可穿戴计算芯片和相应嵌入式系统研发，分别于 2014 年和 2015 年诞生了 Android Wear 和 Android M。许巍等<sup>[3]</sup>提出了“人工皮肤”概念，进一步推动了柔性电子向集成化、功能化和系统化方向发展。

为推动柔性电子技术的发展，我国在 1997 年举办了第一届国际可穿戴计算机学术会议；2013 年 12 月，中华人民共和国科学技术部组织了“西苑论坛”；2015 年成立了中国可穿戴计算产业技术创新战略联盟和中国可穿戴计算产业推进联盟。清华大学、北京大学、北京邮电大学、电子科技大学、浙江大学、华中科技大学、北京工业大学和重庆大学等高校以及中国科学院半导体研究所、微电子研究所、化学研究所和苏州纳米研究所等科研院所也在柔性电子器件的不同方面展开研究；2017 年 10 月，京东方科技集团股份有限公司（以下简称“京东方”）宣布第 6 代柔性有源矩阵有机发光二极管面板（AMOLED, active organic light emitting diode）生产线实现量产，展示了多种可折叠概念的柔性屏。2019 年 2 月，柔宇科技有限公司、华为技术有限公司等厂商相继发布了可折叠手机。

在高灵敏度、穿戴舒适、使用安全的基础上，探索能够实现长久耐用、绿色环保、低成本且易于制造的可穿戴材料以及具有高电子迁移率、高稳定性的半导体材料是柔性电子技术发展的主要方向。其次，柔性电子器件集成化、实现器件完全柔性化和完善柔性结构理论也是柔性电子领域的重要研究内容，其中，实现器件完全柔性化的关键在于微处理器的工艺可制造性。本文基于现有的研究成果，论述基础柔性电子材料的属性需求、柔性化工

艺及发展方向，并讨论不同领域的柔性电子应用及其面临的问题。

## 2 柔性电子器件的基本结构

柔性电子器件包含元器件、柔性基底、交联导电体和黏合层<sup>[4]</sup>等 4 个基本功能单元，柔性电子的基本单元如图 1 所示。

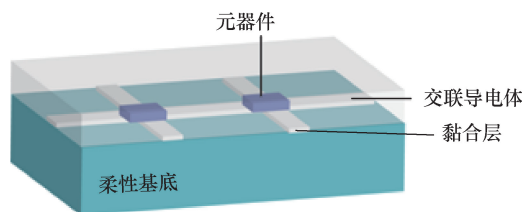


图 1 柔性电子的基本单元

元器件是具有等效电阻、等效电容、等效电感、晶体管、传感器、电池、能量存储、信息存储以及计算单元等功能的柔性电子元器件<sup>[5]</sup>，是执行电路功能和微系统功能的核心单元。柔性元器件与传统元器件的构成差异较大，可由有机材料实现；或者将无机材料先安放在刚性的微胞元岛上，然后将微胞元岛固定到柔性基底上，以免弯曲损坏。

柔性基底是柔性电子器件重要的组成部分，要求其在拥有柔性的同时，还必须具有传统刚性基底的稳定电磁特性，并且能随着结构的扭绕变化保持性能稳定，以确保电子设备在不同形变状态下都能够正常工作。

交联导电体以导电性良好的金属薄膜或烯类材料为主，将分布在柔性基底不同位置的元器件连接在一起。交联导电体的结构形式应保证基底在大范围伸缩时，维持元器件的电磁特性稳定，该方向是柔性电子技术的难点之一。

为了防止尘埃、气体、电磁干扰、射线、湿气或者化学药品侵蚀等干扰，需要为柔性电路与系统建立专门的覆盖保护层（也称为封装层）。用于覆盖保护层的材料通常是由多种材料构成的复合结构，以实现在弯折/弯曲或延展情况下，对电磁、力、热和温/湿度等多要素复杂环境影响进行隔离或处理，降低刚性微胞元岛边缘的扭绕应力效应，避免其与柔性基底分离<sup>[6]</sup>。

## 3 柔性材料

柔性电子器件的柔性主要由超薄的韧性基底

材料提供,为实现器件在高程度形变下仍保持结构和功能的完整性,需要结合具有高延展性、耐疲劳的导体材料和具有高稳定性的半导体材料,共同实现电子器件的柔性化。

### 3.1 柔性导体材料

柔性导体材料是指具有导体特性的柔性材料,包括金属导体、聚合物导体和纳米材料导体等。其中,金属导体包括传统的金、银、铜和液态金属(镓铟锡合金)<sup>[7]</sup>等,主要用于柔性电子器件电极和连接不同器件的导线。由于金属的易疲劳断裂的特性,在重复、高程度形变时,易因断裂而失效,但是可以通过结构设计方法进行有效改善,如美国西北大学的黄永刚教授和美国伊利诺伊大学的Rogers<sup>[8]</sup>教授研究的可拉伸结构,将金、铂等金属电极设计成分形结构,并应用于柔性传感器件中,实现了人体生理信号检测。这类结构具有优异的导电性,但是加工过程通常需要光刻、电子束沉积和反应离子刻蚀等微加工手段,操作复杂、成本高昂,不适合大规模应用<sup>[9]</sup>。而液态金属由于其流动性和优异的电学特性,为柔性无源器件提供了实现器件延展的新思路<sup>[10-11]</sup>。

石墨烯作为储能性能优异的电极材料,被广泛应用于柔性电池和超级电容器中。2018年,清华大学深圳研究生院的研究人员利用氧化石墨烯构筑得到三明治结构的超级电容器。该电容器具有良好的机械稳定性,进行90°和180°弯曲后,其电化学性能并未降低<sup>[12]</sup>。

用于印刷工艺的导电材料大部分选用导电纳米油墨,如纳米颗粒和纳米线等。金属纳米粒子除了具有良好的导电性外,还需具有可制作成薄膜或导线的特性。Park等<sup>[13]</sup>研发了一种可通过静电纺丝进行银纳米颗粒覆盖的橡胶纤维电路,在100%拉力下,导电性达2200 S/cm。纳米线的硬度比普通材质高10倍以上,并且极具弹性,形变后恢复速度快。上述在小尺度下才具备的性质,使得纳米线在新兴领域得到了广泛应用<sup>[14]</sup>。

### 3.2 柔性半导体材料

柔性半导体材料是指具有半导体特性的柔性材料,可分为无机半导体材料、金属氧化物(IGZO, indium gallium zinc oxide)半导体材料、有机半导体材料等。其中,以ZnO和ZnS为代表的无机半导体材料的压电特性好,适合用于可穿戴柔性电子传感器<sup>[15]</sup>中。而IGZO薄膜具有迁移率高、稳定性

好和制作工艺简单等特点,适合用于制备柔性透明导电膜,其透光率可达83%,电阻率小于 $10 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,可应用于液晶显示和静电屏蔽、太阳能电池中。

有机半导体材料可分为小分子型和高分子型两类。小分子型有机半导体材料包括三苯基胺、富勒烯、酞菁、茈萜生物和花菁等<sup>[16]</sup>。常见的高分子型有机半导体材料包括聚乙炔型、聚芳环型和共聚物型等。通常情况下,有机半导体材料迁移率低、空气稳定性差、寿命短;无机纳米半导体材料在电性能、稳定性和可靠性等方面优势明显,但溶液存在难以制备、不易成膜和存在晶界等问题<sup>[17]</sup>。因此,采用无机纳米材料对有机半导体材料进行改进,以提高有机半导体材料的性能<sup>[18]</sup>。

此外,二维纳米材料包括石墨烯、六方氮化硼、二硫化钼和黑磷等,以优异的电学、热学特性为柔性半导体设计提供了新的发展思路。石墨烯是目前已知的最薄材料,室温下的载流子迁移率约为 $15000 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ,该数值超过了硅材料的载流子迁移率10倍,被认为是硅材料的最佳替代者,但它的零带隙效应使其无法实现半导体的逻辑开关。黑磷的载流子迁移率为 $500 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ,并且在半导体应用性能方面优于石墨烯,可以满足微处理器的制造要求,但其制备难度较大,极易在剥离时暴露在空气中,与水蒸气和氧气发生反应。针对二维黑磷的制备方法,Brent等<sup>[19]</sup>提出了液相剥离法制备黑磷纳米片,当有机溶剂表面化学能与二维黑磷表面能相匹配时,利用超声空化作用产生空泡鼓动表面黑磷纳米片振动,使其从块体上剥离<sup>[20]</sup>。澳大利亚昆士兰大学的Batmunkh等<sup>[21]</sup>开发了一种在近红外脉冲激光照射下,使用涡流装置进行液相剥离的方法制备黑磷纳米片。这种新型的剪切剥离方法制备时间短,获得的黑磷纳米片结晶度高,并且原子层厚度仅为 $4.3 \pm 0.4 \text{ nm}$ 。

### 3.3 柔性介质材料

柔性介质材料是指具有绝缘特性的柔性材料,包括应用于柔性显示的基底材料、聚合物电容器介质以及压力电子皮肤传感器的电介质材料等。

柔性显示使用的基底材料具有良好的光学透明度、热稳定性、水氧阻隔性能和柔韧性。现阶段主要的柔性基底材料包括聚合物基底、超薄玻璃基底、不锈钢基底以及新兴的纸质基底和生物复合薄膜基底等。其中,聚合物材料具有化学结构设计性

强的优势,通过分子设计可得到种类繁多的聚合物基底材料,以适应不同的应用需求。但是其阻水、阻氧性能差,存在难以同时满足热稳定性和高光学透明性的问题,考虑将聚合物和其他材料复合是解决此问题的有效途径<sup>[22]</sup>。

聚合物电容器介质在承受高温时,会因发生介质击穿而失效,Azizi等<sup>[23]</sup>利用化学气相沉积技术制造多层六方氮化硼纳米晶体薄膜,并且将薄膜转移至聚醚酰亚胺(PEI)薄膜的两侧,六方氮化硼的宽带隙使其成为良好的绝缘体,从而保护PEI薄膜在高温情况下不发生介质击穿。

天然植物材料作为压力电子皮肤的介质是新兴研究方向。天然植物材料具有长久耐用、绿色环保、低成本且易制造等特性,其中,花粉、花瓣、叶片和蚕丝等材料由于其优异的结构特性,吸引国内外学者进行了大量研究。新加坡南洋理工大学Nam-Joon Cho<sup>[24]</sup>课题组通过模拟花粉微胶囊结构(SFP)改善了电容性压力电子皮肤的电介质层(即活性功能材料层)的空心球微结构,以提高电子皮肤的灵敏度,基于向日葵花粉天然微胶囊的电子皮肤示意图如图2所示;植物微结构可通过使用叶片等材料作为聚二甲基硅氧烷(PDMS, polydimethylsiloxane)软光刻模具来获得<sup>[25-26]</sup>;Wan等<sup>[27]</sup>利用天然植物材料如玫瑰花瓣,经过临界点干燥处理后,直接作为高灵敏压电式压力电子皮肤的电介质材料,不同状态下的玫瑰花瓣如图3所示;清华大学张莹莹课题组通过高温处理蚕丝,获得了可用于可穿戴柔性传感器活性功能材料的碳化蚕丝<sup>[28]</sup>。

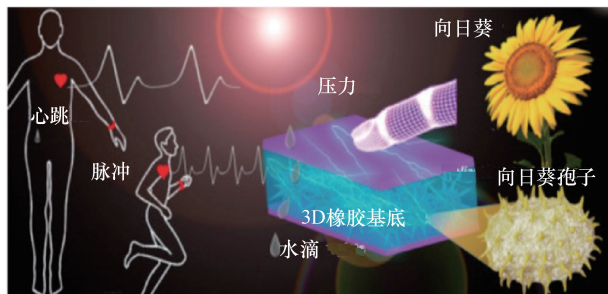


图2 基于向日葵花粉天然微胶囊的电子皮肤示意图

天然植物材料的应用为柔性压力电子皮肤在选材、微结构制备工艺方面提供了新的方案,以代替昂贵的光刻技术,但是在器件性能方面如迟滞现象、动态稳定性,并没有得到本质改善。

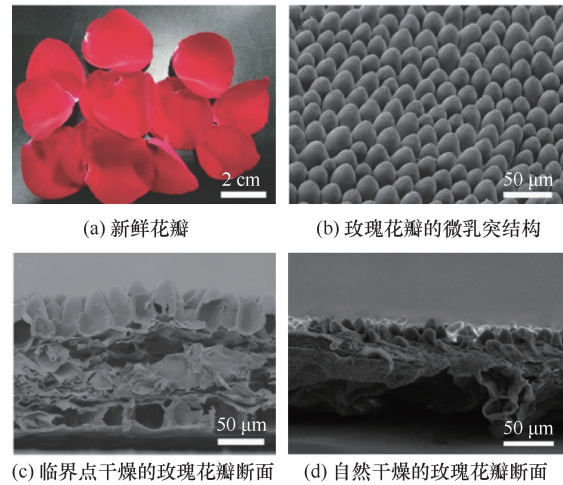


图3 不同状态下的玫瑰花瓣

## 4 实现方法与工艺

实现柔性电子器件与系统的方法较多,主要概括为材料引入柔性和结构引入柔性两种方式。

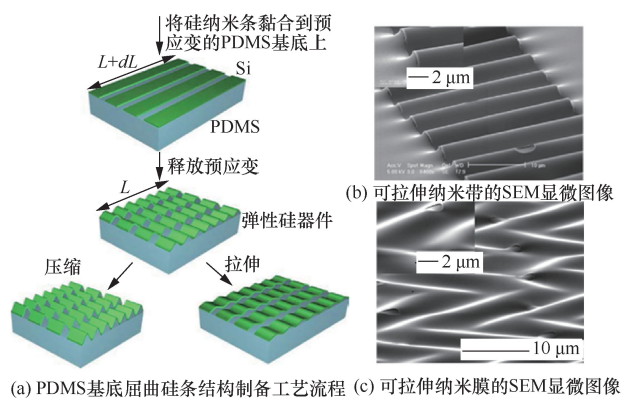
1) 材料引入柔性:即直接通过使用具有柔性的、敏感的半导体材料等实现电子器件的柔性化。早期的柔性材料如玻璃箔、PET薄膜以及不锈钢基底<sup>[29]</sup>等介电常数、压电系数和耦合因数等较小,并且随着形变结构变化明显,性能较差<sup>[4]</sup>。近年来,新兴的石墨烯、黑磷、液态金属(镓锡合金)等新型柔性材料,在电学、光学和机械性能等方面,表现出良好性能,具有较好的应用前景。

2) 结构引入柔性:实现电子器件与系统的柔性化需要材料和结构两者的匹配。从力学角度来看,通过复杂皱折连线结构实现整体的可拉伸性,通过改变薄膜和连接线屈曲结构的波长和波幅来调节形变,可以避免材料本身较大的应变,这些连线的实现工艺可以是光刻、转印和电子束沉积等,将各种导电材料构筑成波纹状<sup>[30]</sup>、网状<sup>[35]</sup>、条形<sup>[31]</sup>、蛇形<sup>[37]</sup>甚至是多维立体<sup>[38]</sup>等构型。其中,结构引入柔性又可分为如下3类。

① 硬薄膜屈曲结构:2009年Song等<sup>[31]</sup>提出了通过转印技术使硅等硬薄膜条在弹性软基底上形成周期性或准周期性曲线结构;美国伊利诺依大学的Rogers教授和美国西北大学的Huang等<sup>[32-33]</sup>实现了能直接集成到多种材料表面上的屈曲结构,PDMS基底屈曲硅条结构制备工艺如图4所示。

2017年,中国科学院力学研究所与美国伊利诺伊大学香槟分校、美国西北大学等单位共同提出了一种连接线厚度与宽度相当的非屈曲结构,延展性

可达 350%，是硬薄膜结构延展性的 6 倍<sup>[34]</sup>。由于导线厚度增加，使其电阻大幅度减小，实现了更好的电学性能和热学性能，并将该结构应用于可延展 LED 阵列、可延展太阳能电池以及可延展柔性天线等器件的研制中。



(a) PDMS 基底屈曲硅条结构制备工艺流程 (c) 可拉伸纳米膜的 SEM 显微图像  
图 4 PDMS 基底屈曲硅条结构制备工艺

② 岛桥互联结构：为避免屈曲结构的拉伸断裂限制，在延伸性要求小于 50%的应用场景中，Kim 等<sup>[35]</sup>设计了通过弯曲导线将各个微电子结构连接起来的直连岛桥结构，PDMS 基底岛桥互联结构制备过程如图 5 所示，蛇形连接线岛桥结构 SEM 图像如图 6 所示。当外部施加应变沿  $x$  方向或  $y$  方向变化时，非共面蛇形互联结构可以有效补偿由外部应变产生的影响，从而在保证拉伸可靠性的前提下，提高结构的延展性。

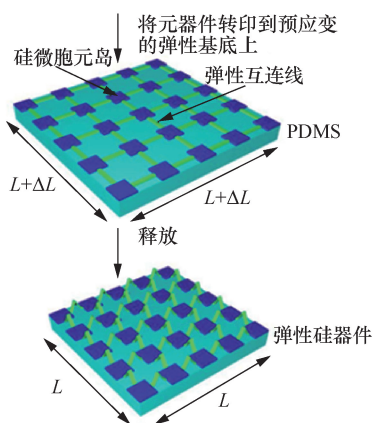


图 5 PDMS 基底岛桥互联结构制备过程

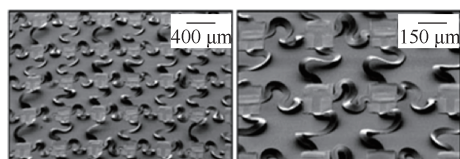


图 6 蛇形连接线岛桥结构 SEM 图像

③ 预应变超柔互联结构：预应变结构将功能器件（岛）黏在经过预拉伸的基底上，释放预应变后，导线发生面外屈曲而拱起，从而实现器件的延展性。将预拉伸直接互联和弯曲互联相结合，可以实现大范围超柔要求的电子系统。预应变与蛇形互联结合方案如图 7 所示，Zhang 等<sup>[36]</sup>设计了一种预拉伸蛇形连接线，将基底预拉伸至形变极限，通过转印技术将蛇形连接线转印到基底，以释放基底应变，数值模拟和实验测量数据表明，该方案的弹性和延伸度是没有预应变结构的两倍左右。

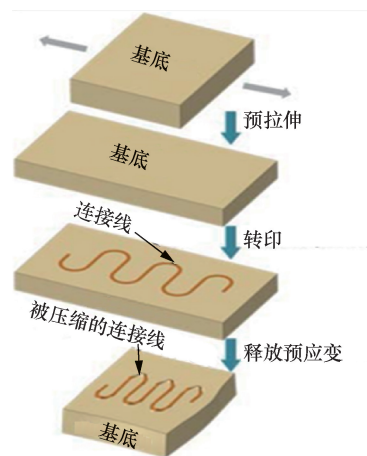


图 7 预应变与蛇形互联结合方案

对比上述 3 种柔性化方案，直接使用柔性功能材料在加工实现方面工艺难度较小，通过力学结构设计将刚性电子器件与柔性基底相结合，实现整体器件柔性的方案加工难度相对较大。

硬薄膜屈曲结构将硬薄膜条黏在柔性基底上以形成波纹屈曲，该结构能达到的最大延展度为 60%。而非屈曲结构通过设计导线厚度与宽度比例，使其延展度不再受曲线“薄膜”结构限制。岛桥互联结构在二维方向拓展了结构的延展长度，延展度可达 100%。预应变结构是硬薄膜屈曲结构和岛桥结构的制备基础，其中，预应变与蛇形连接线结合方案当基底时，预应变为 140%，可实现的对系统应变达 100%。柔性化实现方案比较如表 1 所示。

### 5 柔性电子器件的应用

目前，柔性电子器件的应用主要集中于柔性应变传感器、柔性显示器和薄膜太阳能电池等方面，随着柔性电子技术的发展，柔性电子器件与系统将大规模服务于人们的生活。

表 1 柔性化实现方案比较

柔性化方案	延展度	工艺难度	电性能	文献
直接柔性材料	80%	最小	较差	[14,29]
硬薄膜屈曲结构	约 60%	较大	好	[32-33]
非屈曲结构	350%	较大	良好	[34]
岛桥互联结构	100%	大	良好	[35]
预应变超柔互联结构	100%	较大	良好	[36]

### 5.1 应变传感器件

柔性电子应变传感器不仅具有应变电子特性，并且柔性特质满足可穿戴显示、电子皮肤等需求，可广泛应用于人体日常健康评估、日常健康监控和工业机器人等领域。与传统电子应变传感器相比，柔性电子应变传感器克服了脆性缺点，并具有更好的生物相容性、可拉伸性、透明性、可穿戴性以及易于持续检测等优势<sup>[39]</sup>。

#### 1) 面向健康监测的柔性应变传感器件

柔性电子器件在健康监测领域的应用是最早提出的方向之一，基本方式是可穿戴触摸监测器和体表电子皮肤传感器，用于监测人体生理状况，包括手、胳膊和腿的大幅度弯曲移动以及呼吸、吞咽、发声时肌肉振动、血压和眼压等小幅度变化等<sup>[39]</sup>。这些柔性可穿戴电子传感器能够有效地、不间断地将生理活动信号完整转换为可测、可视电信号。电化学双通道无创血糖测量方法如图 8 所示，该方法消除了传统扎手指的疼痛感，更有利于糖尿病患者的长期血糖监测需要，并且重复测量误差小于 1%<sup>[40]</sup>。

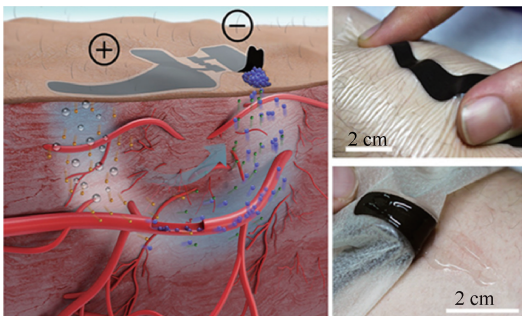


图 8 电化学双通道无创血糖测量方法

#### 2) 面向工业生产的柔性应变传感器件

工业生产过程面临复杂环境、复杂操作和不同场景的响应问题，柔性电子应变传感器使其更容易满足千差万别的场景变化和需要。如应用于温度、湿度和压力等外界刺激监控的共形电子触摸屏<sup>[41]</sup>

和智能检测装置；智能流水线依赖于多功能电子传感器的电子鼻、电子眼等。大部分针对工业生产的柔性应变传感器件侧重于适应更极端的作业环境以降低传感器功耗。此外，自驱动的压电和摩擦生电的传感器件，可以有效减少能耗，在实际工业应用中呈现出巨大的发展潜力<sup>[42]</sup>。

#### 3) 面向军事任务的柔性应变传感器件

可穿戴设备将是未来参战人员和装备平台的基本配置，体积小、重量轻的可穿戴设备可持续跟随获取信息和持续控制，实现人类智力、感官和体能的增强延伸，提高平台的态势响应与对抗能力。据英国路透社报道，2015 年 8 月，美国国防部批准了 0.75 亿美元拨款用于基于柔性材料的电路、传感器和能源部件制作，与硅晶片一起组成下一代电子产品，被拨款单位包括哈佛大学、波音公司和苹果公司等<sup>[46]</sup>。

面向军事应用的可穿戴设备对柔性应变传感器的特性需求包括质量轻、高应变承受度、可自行修复等。有机半导体传感器具有质量小、柔韧性好等优点，可以用来制备高性能的可穿戴式电子设备，而且其生物相容性好，可以实现较长时间的生物信号检测<sup>[43]</sup>。Kim 等<sup>[44]</sup>制备了具有收集温度、压力和物理刺激信号能力的多功能气泡式导管，与发光 LED 连接后，其拉伸性能依然可达 130%，具有高应变承受能力。面对瞬息万变的战场环境，在受到外力破坏后能够自我恢复的自愈器件对参战人员配备设备的重要性不言而喻，Hammock 等<sup>[45]</sup>描述了一种将自愈材料和可穿戴电子传感器结合的方法，制备了具有可恢复性的电子皮肤。

### 5.2 柔性显示

柔性显示是指在柔性基底上制备的、具备可挠曲性的平板显示器件，分为柔性曲面屏、柔性可折叠屏和柔性可弯卷屏，具有质轻、轻薄化、耐用和可收卷的优点。

目前，柔性显示屏技术主要以有机发光二极管（OLED, organic light-emitting diode）显示方案实现，OLED 显示画面质量高、响应速度快，并且可以实现弯曲<sup>[47]</sup>，成为柔性显示领域的主流方案。目前，以 LG 集团、三星集团为代表的电子生产厂商已实现部分柔性显示产品的产业化，上海天马微电子有限公司、京东方、维信诺已陆续推出柔性显示样机，京东方第 6 代柔性 AMOLED 显示屏如图 9 所示。



图 9 京东方第 6 代柔性 AMOLED 显示屏幕

载流子迁移率是将半导体材料应用于柔性显示屏的关键，构成显示器背板的半导体载流子迁移率必须能够驱动足够的电流来操作像素，同时要满足视频码率的要求。目前，主要以多晶硅和氧化物半导体作为 OLED 的背板材料，其中，以非晶 InZnO 和 InGaZn 为代表的氧化物半导体薄膜晶体管具有高载流子迁移率（大于  $30 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ），足以驱动 OLED，其造价远低于低温多晶硅和有机半导体显示器，并且具有高清晰度、快速响应、低功耗和高能效的特点。另外，氧化物半导体工艺温度相对较低（小于  $350^\circ\text{C}$ ），可以与塑料柔性基底兼容实现柔性显示<sup>[54]</sup>。

非晶 ZnO 基薄膜晶体管要满足新型柔性显示的发展需求面临高性能和低温大面积沉积共存的问题。而以高性能非晶态氧化物为主体，基于不同维度的纳米颗粒、纳米管以及薄膜等复合结构氧化物薄膜晶体管的研究为新型薄膜电子设计<sup>[55]</sup>提供了新思路，既能解决薄膜电子高迁移率的核心问题，也能实现低温沉积。

### 5.3 薄膜太阳能电池

柔性太阳能电池是具有能量采集、转化和存储的柔性能量系统，主要类型包括柔性非晶硅太阳能电池、柔性有机太阳能电池和柔性钙钛矿太阳能电池等，由于必须适应移动、共形和全时的应用场景，在结构、机理和电路方面都面临很大挑战。传统的太阳能电池板基于平面电路印刷技术，只能安装于平面刚性架上，Baca 等<sup>[48]</sup>提出把大量超薄的硅太阳能电池集成在塑料薄板上，实现曲面柱体或各种复杂曲面安装。

非晶硅薄膜电池相对于单晶硅、多晶硅电池，具有更强的光谱吸收性、较高的光敏感性以及成本更低等优势。研究者通过优化薄膜制备工艺、改善器件结构等手段不断提高光电转换效率，Ramakrishna 等<sup>[49]</sup>研究了射频功率对本征氢化非晶

硅薄膜结构和光电性能的影响，并在  $110^\circ\text{C}$  的基底温度下，制备了当射频功率为  $50 \text{ W}$  时转换率为  $3.82\%$  的柔性非晶硅薄膜太阳能电池。

柔性有机聚合物太阳能电池适合卷对卷<sup>[50]</sup>、喷墨打印等新型制造技术，具有重量更轻、柔韧性更好、成本更低以及低温制备等突出优点。Tsang 等<sup>[51]</sup>制备了一种玻璃基底的反向级联聚合物太阳能电池，通过对两侧活性层薄膜的优化，匹配吸收光谱与太阳发射光谱，光电转换效率达  $8.62\%$ 。2018 年 3 月 31 日，中国首条全自动量产石墨烯有机太阳能光电子器件生产线在山东菏泽启动。

钙钛矿太阳能电池以较高的光吸收特性和优异的载流子传输特性，成为新型太阳能电池的研究热点。主要从电极材料研发、电子—空穴传输层工艺优化和器件结构调整等方面研究柔性钙钛矿太阳能电池，Heo 等<sup>[52]</sup>制备的钙钛矿太阳能电池光电转换效率可达  $15.96\%$ ；Liu 等<sup>[53]</sup>将超细银纳米线作为钙钛矿太阳能电池的柔性电极，并将弱氧化石墨烯纳米片掺入  $\text{SnO}_2$  中，以提高电子选择层的电子迁移率和柔韧性，制备了光电转化效率为  $12.81\%$  的高效柔性钙钛矿太阳能电池。

## 6 结束语

柔性电子器件具备光、电、磁、力、温和能等多种功能，能够满足不同的应用需求。从目前情况来看，拉伸、卷曲、折叠等柔性要求无论是程度还是范围，近年来都得到大幅度提升，材料和结构是实现柔性的两个主要手段。在短时间内，柔性电子不会与硅基电子在高速、高性能器件领域竞争，因此，不是要取代传统的微电子技术，而是颠覆性创造新型电子器件和产品。与硅基电子的成熟工艺相比，柔性电子在尺度、效率和制备方法等方面都面临巨大的技术挑战。依据目前的发展形势，柔性电子器件将会在未来几年内对可穿戴通信、可穿戴计算、分布式能源、感应式设备以及共形显示等领域产生重大影响。

### 参考文献：

- [1] GATES B D. Flexible electronics[J]. Science, 2009, 323(5921): 1566-1567.
- [2] 黄维. 柔性电子技术将带动万亿元市场[J]. 中国战略新兴产业, 2016(23): 12.  
HUANG W. Flexible electronic technology will drive trillion yuan market[J]. China Strategic Emerging Industry, 2016 (23): 12.

- [3] 许巍, 卢天健. 柔性电子系统及其力学性能[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 137-150.  
XU W, LU T J. Flexible electronic system and its mechanical properties[J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(2): 137-150.
- [4] WONG W, SALLEO A. Flexible electronics: materials and applications[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [5] LI T. Deformation of thin films of electronics materials on polymer substrates[D]. Cambridge: Harvard University, 2006.
- [6] 尹周平, 黄永安. 柔性电子制造: 材料、器件与工艺[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
YIN Z P, HUANG Y A. Flexible electronic manufacturing: materials, devices and technologies[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [7] CHIECHI R, WEISS E, DICKEY M, et al. Eutectic Gallium-indium (EGaIn): a moldable liquid metal for electrical characterization of self-assembled monolayers[J]. *Angewandte Chemie*, 2010, 120(1): 148-150.
- [8] ROGERS J A, SOMEYA T, HUANG Y G. Materials and mechanics for stretchable electronics[J]. *Science*, 2010, 327(5973): 1603-1607.
- [9] 夏凯伦, 蹇木强, 张莹莹. 纳米碳材料在可穿戴柔性导电材料中的应用研究进展[J]. 物理化学学报, 2016, 32(10): 2427-2446.  
XIA K L, JIAN M Q, ZHANG Y Y. Advances in wearable and flexible conductors based on nanocarbon materials[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2016, 32(10): 2427-2446.
- [10] LI R Q, GUO Y X, CHEN W, et al. A flexible liquid-metal alloy bandpass filter[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2018, 28(7): 21265.
- [11] CHEN W, LI Y D, LI R Q, et al. Bendable and stretchable microfluidic liquid metal-based filter[J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2018(99): 1-3.
- [12] JIANG Z, WANG Y, YUAN S G, et al. Ultrahigh-working-frequency embedded supercapacitors with 1T phase MoSe<sub>2</sub> nanosheets for system-in-package application[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(9): 1807116.
- [13] PARK M, IM J, SHIN M, et al. Highly stretchable electric circuits from a composite material of silver nanoparticles and elastomeric fibres[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(12): 803-809.
- [14] 陈阳, 张梓澜, 隋志军, 等. 氢氧化镍纳米线/三维石墨烯复合材料的制备及其电化学性能[J]. 物理化学学报, 2015, 31(6): 109-116.  
CHEN Y, ZHANG Z L, SUI Z J, et al. Preparation and electrochemical performance of Ni(OH)<sub>2</sub> nanowires/three-dimensional graphene composite materials[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2015, 31(6): 109-116.
- [15] KIM D H, ROGERS J A. Stretchable electronics: materials strategies and devices[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(24): 4887-4892.
- [16] LIAO C, ZHANG M, YAO M Y, et al. Flexible organic electronics in biology: materials and devices[J]. *Advanced Materials*, 2014, 27(46): 7493-7527.
- [17] JANG H, LEE W, KI M, et al. Inorganic semiconductor nanomaterials for flexible electronics[M]. Darmstadt: Weinheim Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.
- [18] 郑立荣, 仇志军, 游胤涛, 等. 柔性大面积印刷电子新器件及其物联网应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(3): 135-143.  
ZHENG L R, QIU Z J, YOU Y T, et al. Flexible large area printed electronics for the Internet of things applications[J]. *Materials China*, 2014, 33(3): 135-143.
- [19] BRENT J R, SAVAJANI N, LEWIS E A, et al. Production of few-layer phosphorene by liquid exfoliation of black phosphorus[J]. *Chemical Communications*, 2014, 50(87): 13338-13341.
- [20] YUAN Z Z, LIU D M, TIAN N, et al. Structure, preparation and properties of phosphorene[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2016, 74(6): 488-497.
- [21] BATMUNKH M, VIMALANATHAN K, WU C, et al. Efficient production of phosphorene nanosheets via shear stress mediated exfoliation for low-temperature perovskite solar cells[J]. *Small Methods*, 2019, 3(5): 1800521.
- [22] 兰中旭, 韦嘉, 俞燕蕾. 柔性显示基板材料研究进展[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2017(49): 16.  
LAN Z X, WEI J, YU Y L. Research progress on materials for flexible display substrate[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017(49): 16.
- [23] AZIZI A, GADINSKI M R, LI Q, et al. High-performance polymers sandwiched with chemical vapor deposited hexagonal boron nitrides as scalable high-temperature dielectric materials[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(35): 1701864.
- [24] HASSAN B K, NAM-JOON C, GROVES J T. Fabrication of multi-component, spatially segregated DNA and protein-functionalized supported membrane microarray[J]. *Langmuir*, 2018, 34(33): 9781-9788.
- [25] JIAN M Q, XIA K L, WANG Q, et al. Flexible and highly sensitive pressure sensors based on bionic hierarchical structures[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(9): 1606066.
- [26] SHENG W, GONG L P, SHANG Z J, et al. Novel safeguarding tactile e-skins for monitoring human motion based on SST/PDMS-AgNW-PET hybrid structures[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(18): 1707538.
- [27] WAN Y B, QIU Z G, YING H, et al. A highly sensitive flexible capacitive tactile sensor with sparse and high-aspect-ratio microstructures[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4(4): 1700586.
- [28] WANG C Y, LI X, GAO E L, et al. Wearable strain sensors: carbonized silk fabric for ultrastretchable, highly sensitive, and wearable strain sensors[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(31): 6640-6648.
- [29] CANNELLA V, IZU M, JONES S. Flexible stainless-steel substrates[J]. *Sid Information Display*, 2005, 21(6): 24-27.
- [30] KIM D H, GHAFARI R, LU N, et al. Flexible and stretchable electronics for biointegrated devices[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2012, 14(1): 113-128.
- [31] SONG J, JIANG H, HUANG Y, et al. Mechanics of stretchable inorganic electronic materials[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2009, 27(5): 1107-1126.
- [32] KIM D H, XIAO J, SONG J, et al. Stretchable, curvilinear electronics based on inorganic materials[J]. *Cheminform*, 2010, 22(19): 2108-2124.
- [33] WANG S D, HUANG Y G, ROGERS J A. Mechanical designs for inorganic stretchable circuits in soft electronics[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, 5(9): 1201-1218.
- [34] SU Y, PING X, YU K J, et al. Stretchable electronics: in plane deformation mechanics for highly stretchable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(8): 1604989.
- [35] KIM D H, GHAFARI R, LU N, et al. Electronic sensor and actuator webs for large-area complex geometry cardiac mapping and therapy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(49): 19910-19915.
- [36] ZHANG Y H, WANG S D, LI X T, et al. Experimental and theoretical studies of serpentine microstructures bonded to prestrained elastomers

- for stretchable electronics[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2014, 24(14): 2028-2037.
- [37] ZHANG Y H, FU H R, XU S, et al. A hierarchical computational model for stretchable interconnects with fractal-inspired designs[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014(72): 115-130.
- [38] 郑宁, 黄银, 赵骞, 等. 面向柔性电子的形状记忆聚合物[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46(4): 044602.  
ZHENG N, HUANG Y, ZHAO Q, et al. Shape memory polymers for flexible electronics[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(4): 044602.
- [39] 蔡依晨, 黄维, 董晓臣. 可穿戴式柔性电子应变传感器[J]. *科学通报*, 2017, 62(7): 23-37.  
CAI Y C, HUANG W, DONG X C. Wearable and flexible electronic strain sensor[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(7): 23-37.
- [40] CHEN Y H, LU S Y, ZHANG S S, et al. Skin-like biosensor system via electrochemical channels for noninvasive blood glucose monitoring[J]. *Science Advances*, 2017, 3(12): 1701629.
- [41] SONDHI K, GARRAUD N, ALABI D, et al. Flexible screen-printed coils for wireless power transfer using low-frequency magnetic fields[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29(8): 084006.
- [42] HWANG B U, LEE J H, TRUNG T Q, et al. Transparent stretchable self-powered patchable sensor platform with ultrasensitive recognition of human activities[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(9): 8801-8810.
- [43] XU B X, AKHTAR A, LIU Y H, et al. An epidermal stimulation and sensing platform for sensorimotor prosthetic control, management of lower back exertion, and electrical muscle activation[J]. *Advanced Materials*, 2015, 28(22): 4563-4563.
- [44] KIM D H, LU N, GHAFFARI R, et al. Materials for multifunctional balloon catheters with capabilities in cardiac electrophysiological mapping and ablation therapy[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(4): 316-323.
- [45] HAMMOCK M L, CHORTOS A, TEE B C K, et al. 25th Anniversary article: the evolution of electronic skin (e-skin): a brief history, design considerations, and recent progress[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(42): 5997-6038.
- [46] 冯瑞华. 美国柔性电子技术研发政策与方向[J]. *新材料产业*, 2017(5): 19-22.  
FENG R H. US flexible electronic technology R&D policy and direction[J]. *Advanced Materials Industry*, 2017(5): 19-22.
- [47] 董明睿. 未来半导体材料在柔性显示屏技术中的创新与应用[J]. *科技与创新*, 2019, 123(3): 166-167.  
DONG M R. Innovation and application of semiconductor materials in flexible display screen technology in the future[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2019, 123(3): 166-167.
- [48] BACA A J, YU K J, XIAO J L, et al. Compact mono-crystalline silicon solar modules with high voltage output and mechanically flexible designs[J]. *Energy & Environmental Science*, 2010(3): 208-211.
- [49] RAMAKRISHNA M, JUHIKUMAR I, VENKANNA K, et al. Hydrogenated amorphous silicon solar cells fabricated at low substrate temperature 110°C on flexible PET substrate[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018: 178-186.
- [50] PAGLIARO M, CIRIMINNA R, PALMISANO G. Flexible solar cells[J]. *Chemosuschem*, 2010, 1(11): 880-891.
- [51] TSANG S W, DROLET N, TSE S C, et al. Impact of interfacial dipole on carrier transport in bulk heterojunction poly(3-hexylthiophene) and [6,6]-phenyl C 61-butyric acid methyl ester blends[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(15): 226.
- [52] HEO J H, LEE M H, HAN H J, et al. Highly efficient low temperature solution processable planar type CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PBI<sub>3</sub> perovskite flexible solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016(4): 1572-1578.
- [53] LIU X Y, YANG X D, LIU X S, et al. High efficiency flexible perovskite solar cells using SnO<sub>2</sub>/graphene electron selective layer and silver nanowires electrode[J]. *Applied Physics Letter*, 2018: 203903.
- [54] 兰林锋, 张鹏, 彭俊彪. 氧化物薄膜晶体管研究进展[J]. *物理学报*, 2016, 65(12): 1-22.  
LAN L F, ZHANG P, PENG J B. Research progress on oxide-based thin film transistors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(12): 1-22.
- [55] 兰中旭, 韦嘉, 俞燕蕾. 柔性显示基板材料研究进展[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(1): 9-16.  
LAN Z X, WEI J, YU Y L. Research progress on materials for flexible display substrate[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 49(1): 9-16.

## [作者简介]



于翠屏(1983-), 女, 辽宁抚顺人, 博士, 北京邮电大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为微波器件与射频系统、柔性微波电路。



刘元安(1963-), 男, 四川乐至人, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为宽带移动通信技术、射频与微波器件、综合网络接入技术、移动终端与物联网等。



李杨柳(1995-), 女, 山东临沂人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为柔性微波器件。



郭霞(1970-), 女, 山东青岛人, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为半导体光电子器件和器件物理。