

柔性可穿戴电子应变传感器的研究现状与应用

彭 军¹ 李 津¹ 李 伟¹ 常胜男¹ 刘 皓^{1,2,3*}

(1.天津工业大学纺织学院,天津 300387;2.智能可穿戴电子纺织品研究所,天津 300387;
3.天津工业大学教育部先进复合材料重点实验室,天津 300387)

摘 要 综述了近年来柔性可穿戴电子应变传感器的研究现状与应用,包括压阻、压电、电容、摩擦电和光学效应等信号传感机理,碳材料、金属材料、无机半导体材料、功能复合材料等柔性可穿戴电子的常用材料,柔性电子传感器的制造方法及其在健康监测、运动监测、家庭康复、人机接口和软机器人等方面的潜在应用,最后提出了柔性可穿戴电子应变传感器面临的挑战与未来发展方向。

关键词 柔性传感器,可穿戴电子,制造方法,人体监测

Research progress and application of flexible wearable electronic strain sensor

Peng Jun¹ Li Jin¹ Li Wei¹ Chang Shengnan¹ Liu Hao^{1,2,3}

(1.Department of Textiles,Tianjin Polytechnic University,Tianjin 300387;
2.Institute of Smart Wearable Electronic Textiles,Tianjin 300387;
3.Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials,Ministry of Education,
Tianjin Polytechnic University,Tianjin 300387)

Abstract The recent research advances of wearable electronic strain sensors and applications,including signal transduction mechanisms, general materials, manufacture processes and potential applications was focused. Piezoresistivity, piezoelectricity and capacitance were three common signal transduction mechanism, moreover, triboelectric and optical effect mechanism were promised. Common materials used in flexible wearable electronic sensors, such as carbon materials, metal materials, inorganic semiconductors materials and functional composite materials were also introduced. The flexible wearable electronic sensors also had the practical and potential applications, which focused on health monitoring, motion monitoring, family rehabilitation, human-machine interfaces and soft robotics techniques. Finally, the challenges and future development of flexible wearable electronic strain sensors were presented.

Key words flexible sensor, wearable electronics, manufacture processe, human monitoring

随着智能产品的普及,可穿戴电子设备呈现出巨大的市场前景。传感器作为主要的核心部件之一,将影响可穿戴设备的功能设计与未来发展^[1]。近年来,柔性可穿戴电子应变传感器在健康监测方面发挥着非常重要的作用^[2]。例如,将传感器植入并缠绕在动脉血管周围,测量人体的血压^[3];将传感器安装在手腕,测量人体的心率^[4]。然而,对于制造出高灵敏度、高分辨率、快速响应的可穿戴电子传感器仍是一个艰巨的挑战^[5]。笔者总结了近年来柔性

可穿戴电子应变传感器常见的几种信号转换机制、常用材料、制作方法,及其在健康监测、运动监测、家庭康复、人机接口和软机器人等方面的潜在应用。

1 传感机理

柔性传感器主要是将外部形变转化为电信号。有效地将外部形变转化为电信号是柔性可穿戴电子应变传感器的核心技术。柔性可穿戴电子应变传感器常见的信号转换机制有 3 种形式,即压阻^[6]、压

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51473122);中国博士后科学基金面上资助(2016M591390)

作者简介:彭军(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为基于银纳米线可拉伸应变传感器。

联系人:刘皓,副教授,主要从事智能纺织品和纳米材料的研究。

电^[7]和电容^[8]。另外,摩擦发电^[9]、光学效应^[10]等转换机制的传感器也受到了高度关注,图 1 展示了传感器的几种常见传感机理。

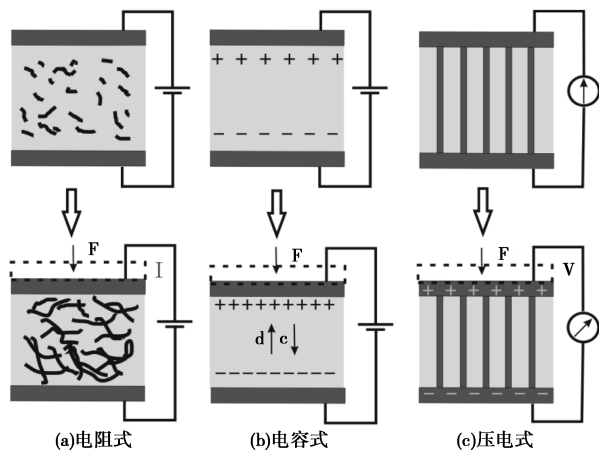


图 1 柔性传感器 3 种信号转换机制示意图

1.1 压阻

压阻传感器是将力的变化转换成电测量系统容易检测到的电阻变化,进而可以方便地利用电学测试系统来监测外力的变化。压阻传感器由于简单的设备设计和读数机制等优点,是当前研究最为广泛的一种电子传感器^[11]。Han 等^[12]通过把聚二甲基硅氧烷(PDMS)和导电碳纳米粒子结合起来,借助于冲压工艺的微图案化,制造高灵敏度的柔性电子应变传感器,可用于医疗领域。来自苏州纳米有限公司的 Wang 等^[13]研发了一种高灵敏度、快速响应、丝成型柔性压阻传感器。首先,通过将精致的丝绸纺织品用作模具,把它们反向微图案复制到 PDMS 表面上;然后,将均匀的微图案化 PDMS 膜与单壁碳纳米管(SWNT)超薄膜组合来制造超敏电子皮肤装置。这一由两层图案化的 SWNT/PDMS 膜构成的灵活电子皮肤感测装置具有超快的灵敏度,用于检测微小的力,响应时间快,稳定性和重复性好,并且器件的检测极限低至 0.6 Pa。该电子皮肤设备在监测人体生理信号中的应用被证明具有出色的感测性能,可以应用于预防疾病,以及早期疾病的预测。

1.2 压电

压电传感器是利用某些电介质受力后产生的压电效应制成的传感器。压电效应通过压电材料将机械应力和振动转换成电信号。这种柔性压力传感器具有较高的灵敏度和快速反应的能力,可用于人体脉搏的跳动或声音的震动的检测,在柔性可穿戴式电子传感器方面拥有良好的应用前景^[14]。Joshi

等^[15]提出了一种高灵敏压电薄膜传感器,这种传感器用于人体桡动脉脉搏测量,灵敏度可以达到 200 mV/kPa,检测压力范围为 1 k~30 kPa。Li 等^[16]提出了聚偏二氟乙烯和三氟乙烯(PVDF-TrFE)压电聚合物膜双模操作颅内压(ICP)传感器。这种传感器具有更高的线性度和更低的功耗,同时具有更好的灵敏度和适应性,因而在颅内压监测中具有广泛的应用前景。

1.3 电容

电容式传感器是通过电容量的变化来反映被测的机械量信息,敏感单元通常为具有可变参数的电容器,电容式传感器平行板间的间距(d)、正对面积(s)和介电常数(ϵ)任意参数的改变都会影响电容。这种传感器的优势在于对于外界的刺激反应敏感,并能在低能耗情况下检测微小的静态力^[17]。Li 等^[18]使用新型 3D 打印方法成功制造出具有高灵敏度触觉和电化学传感的可伸缩电容式传感器,将其集成到电子表皮中具有巨大的潜在应用价值。Lee 等^[19]提出一种低成本的柔性压力传感器,是由具有均匀分布的微孔的 PDMS 弹性体薄膜作为介电层。由于具有多孔结构,在低压(<0.02 kPa)下具有相对较高的灵敏度(1.18 kPa⁻¹),以及 150 ms 的快速响应时间。

1.4 其他传感机制

随着柔性可穿戴电子应变传感器的快速发展,摩擦电效应、光学效应等新型信号转换机制的传感器被提出。Cai 等^[20]根据摩擦电效应提出了一种超灵敏可穿戴柔性传感器。这种传感器通过自行向其传感部位供应能量,解决了能量的消耗问题,推动了不需要外部供能的自驱动传感器向前发展。Ramuz 等^[10]根据光学效应开发出一种可伸缩性和延展性柔性光学压力传感。该传感器拥有高达 0.2 kPa⁻¹的灵敏度,并且可以检测到低至 30 mg 的压力,在电子皮肤和生理测量方面有应用潜力。

2 柔性可穿戴电子的常用材料和制作方法

2.1 柔性基底

基底材料是柔性传感器很重要的影响因素。良好的机械性能以及光滑的表面都是柔性基底材料必须具备的。如 PDMS、聚酰亚胺(PI)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚氨酯(PU)等都常被用作柔性可穿戴电子应变传感器的基底^[21-22]。

PDMS 是硅基聚合物,杨氏模量低,具有光学透明、化学性质稳定、耐水性、优异的电绝缘性能、耐

腐蚀性强和成本低等优点,而且在高温下具有较好的稳定性和传导性,其柔韧性和可伸展性使传感器具有相应的可拉伸和压缩的性能^[23]。由于PDMS制备过程简单,易于与电子材料相结合,这使其成为了柔性可穿戴电子应变传感器的一种常用材料^[24]。

PI作为有机高分子材料,具有良好的机械性能、绝缘性、抗腐蚀、稳定性和耐温性等优点。它良好的耐温性可以适应大范围的温度变化,耐温点可达到250℃,且可长期使用,无明显熔点。此外,PI薄膜还拥有良好的弯曲能力,抗张强度在100MPa以上,即使在非常大的机械压力下,也不会产生物理损坏,这使其成为可穿戴电子传感器的一种常用基底材料^[25]。

此外,PET和PU也是常用的柔性可穿戴电子应变传感器件的基底材料。例如,Li等^[26]通过制作多孔PU弹性基体,将聚吡咯(PPy)分散在多孔PU基体内和表面,提出了PPy/PU弹性体的可逆导电机理。目前一种新的可伸缩的导电PPy/PU应变传感器已被研发出来,被运用于人体呼吸检测器,监视正常的人体呼吸状态。

2.2 碳材料

柔性可穿戴电子应变传感器常用的碳材料有石墨烯和碳纳米管等。以石墨烯和碳纳米管为代表的纳米碳材料兼具良好的柔性和优异的导电性,且具有化学稳定、热稳定等优点,在柔性导电材料领域展现了极大的应用潜力。Wang等^[13]提出了三明治结构的柔性电子皮肤传感器,通过将SWNT薄膜放置在两层柔性PDMS薄膜之间,实现了传感器的高稳定性和高灵敏度,在人体生理活动的信号监测方面有很好的应用前景。Nie等^[27]提出了嵌入式多壁碳纳米管网格的柔性透明应变传感器,显示出高达87%的高透光率和高灵敏度。在2000次拉伸/释放循环后,传感器没有明显的改变,在检测人体内的运动方面取得了满意的结果。Bae等^[28]在柔性的弹性橡胶基体上编造了一个花环,通过反应离子刻蚀和冲压技术制成石墨烯透明应变传感器。在拉伸应变高达7.1%的情况下研究了它们的压阻性能,并将其安置在手指上来测量手指运动的幅度大小和方向。

2.3 金属材料

在柔性可穿戴电子应变传感器中,金属是主要的电极和导线材料。金属纳米颗粒和纳米线除了具有良好的导电性能外,还可以被用于制备感应材

料^[29]。例如,Park等^[30]通过静电纺丝技术,将银纳米颗粒覆盖到橡胶纤维上,使得在100%拉力下,橡胶纤维的导电性达到2200S/cm。Gong等^[31]提出了一种超薄金纳米线可穿戴式高灵敏度压力传感器。这种超薄金纳米线传感器能够检测到低于13Pa的压力和快速的响应时间(<17ms),拥有较高的灵敏度(>1.14kPa⁻¹)和高稳定性(>50000装卸周期)。因为具有优越的传感特性和机械灵活性,使传感器可用于实时监测人体血液脉冲。Shuai等^[32]提出了基于银纳米线嵌入式微阵列结构的高灵敏度柔性压力传感器。这种传感器具有高灵敏度(2.94kPa⁻¹)、低检测限(<3Pa)、短响应时间(<50ms)、优异的灵活性和长期循环稳定性的优势。这种高灵敏度柔性压力传感器在电子皮肤及可穿戴医疗监护仪的应用中显示出潜力。

2.4 无机半导体材料

ZnO和ZnS等无机半导体材料由于其优良压电特性,在柔性可穿戴电子应变传感器中有良好的应用前景^[33]。Wang等^[34]开发了一种基于ZnS矩阵的柔性压力传感器。这种传感器响应时间小于10ms,空间分辨率高达100μm,在数千个测试周期后仍具有高的稳定性和可重复性能,因此通过记录手写签名和签名者施加的压力,可用于更安全的签名收集。Xiao等^[35]提出了一种基于ZnO纳米线/聚苯乙烯纳米纤维混合结构的高应变传感器。该新型应变传感器可承受高达50%的应变,具有高耐久性、快速响应和高灵敏度,在快速的人体测量中表现出良好的性能。此外,该传感器可以由太阳能电池驱动,在户外传感器系统中具有潜在的应用前景。

2.5 功能复合材料

作为柔性可穿戴电子应变传感器件的活性材料,单纯纳米材料难以在宏观上集成有序的纳米规格阵列,因而,在实际应用中,柔性可穿戴电子应变传感器的尺寸受到一定范围的限制。为了使柔性可穿戴电子应变传感器在较大的应变范围下拥有良好的导电性,通常将弹性体(PDMS、PU、PI、PET等)与导电材料(石墨烯、碳纳米管、金纳米粒子、银纳米线等)相结合,制成一种复合型材料。例如Boland等^[36]将液体剥落的石墨烯注入天然橡胶中以产生导电复合材料。这种导电复合材料制成的传感器具有高灵敏、高应变和快速响应能力。在超过800%的应变下工作,传感器依然具有良好的稳定性。更重要的是,这种传感器可以有效地跟踪动态应变,在至少160Hz的振动频率下工作良好。在60Hz时,

可以在应变率超过 6000%/s 的情况下监测至少 6% 的应变。因此,用这种复合材料制作的体育运动传感器,可以有效地监测关节和肌肉运动以及呼吸和脉搏。Yao 等^[37]通过将还原后的氧化石墨烯填充到 PU 海绵内里,制备出具有高灵敏度和快速响应的可穿戴电子应变传感器。Amjadi 等^[38]提出了一种高度可伸缩、敏感的银纳米线弹性体制作的应变传感器,这种应变传感器的灵敏度在 2~14 范围内,拉伸强度高达 70%,可应用于智能手套、实时运动检测和虚拟环境中模拟控制。

2.6 制作方法

柔性可穿戴电子应变传感器可以通过不同的方法制作,如 3D 打印技术、过滤方法、涂层技术、化学气相沉积法和印刷方法等。3D 打印技术逐步兴起,在部分领域颠覆了传统的设计和制造方式,为可穿戴电子传感器的柔弹性的实现创造了新的可能。例如,哈佛大学的 Muth 等^[39]利用 3D 打印技术将特殊导电材料注入高分子弹性材料中,制作了拉伸率达到 400% 的应变式触觉传感器。Xu 等^[40]通过过滤方法制作了一种高度可伸缩、敏感的基于银纳米线弹性体的应变传感器。银纳米网络薄膜先被涂在一个中间基底上,随后通过过滤技术将其转移到 PDMS 阵列上。Lee 等^[41]通过喷涂金属纳米颗粒在 PDMS 薄膜上,制成应变传感材料。用其制备的拉伸应变传感器具有高度敏感,并能持久地感测各种拉伸/压缩应变性能。Cai 等^[42]通过化学气相沉积法合成透明碳纳米管浸透薄膜,薄膜的电导率和光学透明度可通过成长参数控制。Woo 等^[43]通过微接触印刷方式,将导电弹性体油墨(碳纳米管掺杂的 PDMS)微图案化,提出了一种高弹性的电容式压力传感器阵列。当受到压力和拉伸应变时,该传感器的电响应是高度线性的、可靠的和可逆的,其基于薄的全弹性平台,可整合到具有人体皮肤复杂曲率的表面上。这种传感器可以检测到不同类型的人体运动 and 不同突起图案产生的空间压力分布。

3 柔性可穿戴电子应变传感器的应用

3.1 健康监测

医疗健康和卫生保健正引起越来越多人的关注,其中血压^[43]、脉搏^[44-45]和呼吸率^[30]的检测和监控是身体健康指标的重要评估标准,因而发出具有高灵敏并能够记录人体健康信息的可穿戴式电子传感器变的尤为重要。现在,可穿戴技术由于具有易实现、早期诊断和长期监测能力等优点,获得了很高

的关注。

3.2 运动监测

随着社会的快速发展,人们越来越需要对人体活动进行实时监测。通过安装可穿戴电子应变传感器在人体的不同部位,可实现运动性能的检测。例如,在腕部安装应变传感器,应变传感器的电压随着腕部的弯曲增加,随后在他们伸直之后回到初始值;通过可穿戴电子应变传感器输出的不同电压信号,可以判断人体的坐姿形态^[46]。同时,还可以将可穿戴电子应变传感器安装在人体的膝盖上,从而实时监控不同的膝盖运动模式如步行、奔跑、跳跃和下蹲等^[47-48]。

3.3 家庭康复

随着可穿戴技术的快速发展,通过感测技术和虚拟现实(VR)环境的结合,可以实施家庭康复计划。例如,南加州大学康复工程研究中心通过 VR 游戏来帮助人体完成康复训练^[49]。同时,也可以利用无线医疗监测系统,收集生理和运动数据,从而促进家庭环境中的康复干预。例如飞利浦研发团队开发了一个中风康复训练器^[50],通过可穿戴电子应变传感器系统记录患者的运动,分析与个人运动目标的偏差数据,并向患者和治疗师提供反馈。

3.4 人机接口和软机器人

当前技术的主要目标是建立智能人机接口,通过可穿戴感知系统实现智能人机接口。柔性可穿戴电子应变传感器的信号能够被用于驱动智能机器人,例如,研究人员用可拉伸的、皮肤覆盖的和可穿戴电子应变传感器开发了各种智能手套^[42,51],通过手指的弯曲和伸直来控制机器人执行不同的任务^[52]。由于具有高应变敏感能力、低制作成本和操作简单等优点,可穿戴电子应变传感器开发的智能手套系统比基于光纤和金属应变测量仪的传统系统更有优势。柔性可穿戴电子应变传感器还可被应用于软机器人^[53-55]。为提供输入信号到反馈控制器(如感知人工皮肤),柔性可穿戴电子应变传感器允许软机器人感知环境和与环境目标交互。软机器人还可以通过智能手套系统远距离控制,并执行外科手术操作或一些人类无法完成的精细化和危险的工作。

4 结语与展望

柔性可穿戴电子应变传感器的发展非常迅速,其在健康监测、运动监测、家庭康复、人机接口和软机器人等方面都具有广泛的应用前景。然而,随着

研究的进一步深入,柔性可穿戴电子应变传感器还将面临新的挑战。首先,应该实现材料和器件结构的进一步创新,以产生足够的功率来延长各种可穿戴设备的运行周期。对于灵活的传感器设备,具有多种感测模式的集成传感器阵列的小型化设计,对于消除信号串扰和区分各种外部刺激至关重要。其次,还需要开发灵活的电源管理电路,以最小的功率损耗有效地管理和传输所产生的功率到有源部件,从而提高传感器便携性,降低传感器的制造成本。再次,为了准确监测生理和触觉信号,应开发灵活的信号处理电子设备用于收集数据,以及从传感器到通信设备的输出信号的传输。最后,通过传感器结构的互连拉伸性和集成电路系统的创新设计,发展无线传输技术,将采集的数据与移动终端结合,实现数据实时传输、分析与反馈。随着新材料和新技术的不断发展,柔性可穿戴电子应变传感器呈现出更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Qian X, Su M, Li F, et al. Research progress in flexible wearable electronic sensors[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2016, 74(7): 565.
- [2] Dr V M, Prof R S. Tactile devices to sense touch on a par with a human finger[J]. *Angewandte Chemie*, 2008, 47(41): 7808-26.
- [3] Bingger P, Zens M, Woias P. Highly flexible capacitive strain gauge for continuous long-term blood pressure monitoring[J]. *Biomedical Microdevices*, 2012, 14(3): 573.
- [4] Tuba Y, Robert F, Yang H. Detecting vital signs with wearable wireless sensors[J]. *Sensors*, 2010, 10(12): 10837-10862.
- [5] Chen L Y, Tee B C K, Chortos A L, et al. Continuous wireless pressure monitoring and mapping with ultra-small passive sensors for health monitoring and critical care[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5028.
- [6] Alamusi, Hu N, Fukunaga H, et al. Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites[J]. *Sensors*, 2011, 11(11): 10691-10723.
- [7] Pan C, Dong L, Zhu G, et al. High-resolution electroluminescent imaging of pressure distribution using a piezoelectric nanowire LED array[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 752-758.
- [8] Zhong J, Zhang Y, Zhong Q, et al. Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(6): 6273.
- [9] 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.
- [10] Ramuz M, Tee C K, Tok B H, et al. Transparent, optical, pressure-sensitive artificial skin for large-area stretchable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(24): 3223-3227.
- [11] Choong C L, Shim M B, Lee B S, et al. Highly stretchable resistive pressure sensors using a conductive elastomeric composite on a micropylramid array[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(21): 3451-3458.
- [12] Han C J, Chiang H P, Cheng Y C. Using micro-molding and stamping to fabricate conductive polydimethylsiloxane-based flexible high-sensitivity strain gauges[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 618.
- [13] Wang X, Gu Y, Xiong Z, et al. Silk-molded flexible, ultrasensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(9): 1336-1342.
- [14] 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(7): 635-649.
- [15] Joshi A B, Kalange A E, Bodas D, et al. Simulations of piezoelectric pressure sensor for radial artery pulse measurement[J]. *Materials Science & Engineering B*, 2010, 168(1): 250-253.
- [16] Li C, Wu P M, Shutter L A, et al. Dual-mode operation of flexible piezoelectric polymer diaphragm for intracranial pressure measurement[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(5): 240.
- [17] Frutiger A, Muth J T, Vogt D M, et al. Capacitive soft strain sensors via multicore-shell fiber printing[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(15): 2440-2446.
- [18] Li K, Wei H, Liu W, et al. 3D printed stretchable capacitive sensors for highly sensitive tactile and electrochemical sensing[J]. *Nanotechnology*, 2018.
- [19] Lee B Y, Kim J, Kim H, et al. Low-cost flexible pressure sensor based on dielectric elastomer film with micro-pores[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2016, 240: 103-109.
- [20] Cai F, Yi C, Liu S, et al. Ultrasensitive, passive and wearable sensors for monitoring human muscle motion and physiological signals[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2016, 77: 907-913.
- [21] Kaltenbrunner M, Sekitani T, Reeder J, et al. An ultra-light-weight design for imperceptible plastic electronics[J]. *Nature*, 2013, 499(7459): 458-463.
- [22] Wagner S, Bauer S. Materials for stretchable electronics[J]. *Mrs Bulletin*, 2012, 37(37): 207-217.
- [23] Sekitani T, Someya T. Stretchable, large-area organic electronics[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(20): 2228-2246.
- [24] Sekitani T, Noguchi Y, Hata K, et al. A rubberlike stretchable active matrix using elastic conductors[J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1468-1472.
- [25] Moon H, Seong H, Shin W C, et al. Synthesis of ultrathin polymer insulating layers by initiated chemical vapour deposition for low-power soft electronics[J]. *Nature Materials*, 2015, 14

- (6):628.
- [26] Li M, Li H, Zhong W, et al. Stretchable conductive polypyrrole/polyurethane (PPy/PU) strain sensor with netlike microcracks for human breath detection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(2):1313.
- [27] Nie B, Li X, Shao J, et al. Flexible and transparent strain sensors with embedded multiwalled-carbon-nanotubes meshes[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(46).
- [28] Bae S H, Lee Y, Sharma B K, et al. Graphene-based transparent strain sensor[J]. *Carbon*, 2013, 51(1):236-242.
- [29] Jiang J, Bao B, Li M, et al. Fabrication of transparent multilayer circuits by inkjet printing[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(7):1420-1426.
- [30] 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.
- [31] Gong S, Schwalb W, Wang Y, et al. A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires[J]. *Nature Communications*, 2013, 5(2):3132.
- [32] Shuai X, Zhu P, Zeng W, et al. Highly sensitive flexible pressure sensor based on silver nanowires-embedded polydimethylsiloxane electrode with microarray structure[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(31):26314-26324.
- [33] Li R Z, Hu A, Zhang T, et al. Direct writing on paper of foldable capacitive touch pads with silver nanowire inks[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(23):21721.
- [34] Wang X, Zhang H, Yu R, et al. Dynamic pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(14):2324.
- [35] Xiao X, Yuan L, Zhong J, et al. High-strain sensors based on ZnO nanowire/polystyrene hybridized flexible films[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(45):5440.
- [36] Boland C S, Khan U, Backes C, et al. Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(9):8819.
- [37] Yao H B, Ge J, Wang C F, et al. A flexible and highly pressure-sensitive graphene-polyurethane sponge based on fractured microstructure design[J]. *Adv Mater*, 2013, 25:6692-6698.
- [38] 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.
- [39] Muth J T, Vogt D M, Truby R L, et al. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(36):6307-6312.
- [40] Xu F, Zhu Y. Highly conductive and stretchable silver nanowire conductors[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(37):5117-5122.
- [41] Lee J, Kim S, Lee J, et al. A stretchable strain sensor based on a metal nanoparticle thin film for human motion detection[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(20):11932-11939.
- [42] Cai L, Song L, Luan P, et al. Super-stretchable, transparent carbon nanotube-based capacitive strain sensors for human motion detection[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(6157):3048.
- [43] Woo S J, Kong J H, Kim D G, et al. A thin all-elastomeric capacitive pressure sensor array based on micro-contact printed elastic conductors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(22):4415-4422.
- [44] Bingger P, Zens M, Woias P. Highly flexible capacitive strain gauge for continuous long-term blood pressure monitoring[J]. *Biomedical Microdevices*, 2012, 14(3):573-581.
- [45] Pang C, Lee G Y, Kim T I, et al. A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(9):795.
- [46] Wang Y, Wang L, Yang T, et al. Wearable and highly sensitive graphene strain sensors for human motion monitoring[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(29):4666-4670.
- [47] Liu Y, Hu Y, Zhao J, et al. Self-powered piezoionic strain sensor toward the monitoring of human activities[J]. *Small*, 2016, 12(36):5074-5080.
- [48] Yamada T, Hayamizu Y, Yamamoto Y, et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(5):296-301.
- [49] Yao S, Zhu Y. Wearable multifunctional sensors using printed stretchable conductors made of silver nanowires[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(4):2345-2352.
- [50] Rizzo A, Requejo P, Winstein C J, et al. Virtual reality applications for addressing the needs of those aging with disability[J]. *Studies in Health Technology & Informatics*, 2011, 163:510.
- [51] Saini P, Willmann R, Huurneman R, et al. Philips stroke rehabilitation exerciser; a usability test[M]. *ACTA Press*, 2008.
- [52] Yamada T, Hayamizu Y, Yamamoto Y, et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(5):296.
- [53] Rahimi R, Ochoa M, Yu W, et al. Highly stretchable and sensitive unidirectional strain sensor via laser carbonization[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(8):4463.
- [54] Meevay M A, Correll N. Materials science materials that couple sensing, actuation, computation, and communication[J]. *Science*, 2015, 347(6228):1261689.
- [55] Majidi C. Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(1):5-11.