

基于碳化丝布的高灵敏选择性二维电阻式应变传感器

裴 帅, 李 明, 刘瑞丽

上海交通大学电子工程系, 上海
Email: ruililiu@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2021年2月1日; 录用日期: 2021年2月17日; 发布日期: 2021年2月25日

摘 要

柔性应变传感器在人体运动检测中起到至关重要的作用。本研究基于捻度取向不同的碳化丝布, 提出了一种具有高灵敏、大应变范围和高选择性的二维柔性电阻式应变传感器, 该传感器可以有效识别平面内应变的方向及大小, 灵敏度(GF)可达18.70, 应变检测范围达100%, x轴与y轴达100以上的灵敏度差异倍率, 且具有500次以上的循环拉伸稳定性, 可以实现应变大小与方向的传感检测。

关键词

二维应变传感器, 电阻式, 选择性, 碳化丝布

Highly Sensitive and Selective Two-Dimensional Resistance Strain Sensor Based on Carbonized Silk Fiber

Shuai Pei, Ming Li, Ruili liu

Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai
Email: ruililiu@sjtu.edu.cn

Received: Feb. 1st, 2021; accepted: Feb. 17th, 2021; published: Feb. 25th, 2021

Abstract

Flexible strain sensor plays an important role in human motion detection. This study based on carbonized silk fiber with different twist orientations presents a kind of high sensitivity, large

strain range and high selectivity of two-dimensional flexible resistive strain sensor. The sensor can effectively identify the direction and size of the strain in the plane. The sensitivity (GF) of the sensor can reach 18.70, the strain detection range can reach 100%, the sensitivity ratio of X axis to Y axis is more than 100 times, and has more than 500 times of cyclic tensile stability, which can realize the sensing detection of strain size and direction.

Keywords

Two-Dimensional Strain Sensor, Resistive, Selective, Carbonized Silk Fiber

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人工交互技术的发展, 柔性应变传感作为柔性电子的重要组成部分之一, 可在健康监控、行为检测、柔性机器人等多个方向得到广泛应用。其中, 柔性电阻式应变传感器由于其具有检测灵敏、工作原理简单、成本低, 生物可兼容等优点而成为该领域的重要研究方向之一。传统的基于金属箔等材料制备的应变传感器由于其可拉伸工作范围小和低灵敏度等问题, 已不再合适作为人体可穿戴方向的研究。目前, 有许多的研究工作者采用银纳米线[1] [2]、铜纳米线[3]、银纳米颗粒[4]等纳米金属材料, 或采用碳黑[5]、碳纳米管[6] [7] [8] [9]、还原氧化石墨烯[10] [11]、碳纤维[12] [13] [14]等碳材料, 以及导电聚合物[15] [16] [17]、离子液体[18]和液态金属[19] [20]等新材料作为传感敏感层, 与弹性封装基底复合制备柔性电阻式应变传感器。

然而, 目前研究的大部分柔性电阻式应变传感器, 不论在结构上属于夹层结构还是纤维同轴结构, 其检测原理均是在对单个维度的形变进行传感检测。而人体的皮肤表面是近似的二维平面, 这要求在检测时传感器的工作主轴必须严格贴合在应变发生的方向。事实上, 人体的诸多运动行为会导致表面皮肤的应变变化更为复杂, 除了应变的大小同样对应变的方向也需要进行检测。在这一工作场景下传统的一维传感会导致数据量缺失无法到达检测要求。

二维柔性电阻式应变传感器通过将两个一维的柔性电阻式应变传感器正交贴合来分别实现两个正交方向的应变检测, 再通过应变的矢量合成得到想要的平面传感信息。但是实际上, 机械地将两个一维传感器进行组合并不能实现二维传感检测的效果。来自非传感主轴方向上的应变会导致敏感传感膜横向拉伸, 改变其导电通路, 引起干扰性的电阻变化。因此, 具有高度选择性是实现二维柔性电阻式应变传感器的必要条件。

为了实现具有高选择性的二维应变传感器, 往往需要特殊的结构与工艺设计。Seung Hwan Ko 等人通过在垂直与拉伸检测方向上引入预拉伸成膜工艺, 减小了垂直方向上拉伸对传感器电阻变化的影响, 可以实现 35%应变下 $GF > 20$ 的灵敏传感且 0° 方向上几乎没有电阻变化[21]。Jong-Man Kim 等人通过在硬弹性体中引入“口”字状的软弹性体区域, 在对其应变分布的仿真中分析可以看出, 大应变的区域会集中于附载应变方向, 从而保护了正交方向上的应变, 实现 60%应变下 $GF > 20$ 的灵敏传感且选择性 $\Delta GF > 20$ [22]。Wanjun Park 等人通过模板工艺制备出具有蛇形结构的敏感膜, 使在 x 方向与 y 方向进行拉伸的过程中受到的应变电阻的占比不同, 从而造成不同方向上的灵敏度差异, 但是这种方式并不能显著提高正交信号之间的选择性[23]。Sang-Gook Kim 等人通过化学沉积制备了具有高度取向的 CNT 阵列,

然后将 CNT 阵列在基底上干纺丝制备出具有高度取向的 CNT 纤维传感器,这种高度取向性的传感材料同样能提高二维应变传感器的选择性。虽然他们的以上工作较好的解决了二维传感器选择性的问题,但是需要复杂的结构或者特殊的工艺作为支持。

另一方面,将一些原本不导电的材料进行高温碳化后得到的碳化导电材料一直以来都是应变传感器的敏感传感材料的选择之一,碳化后的材料能后保持原材料的一些特殊的结构是这类材料的优势之一,同时优良的导电性以及应变作用下发生的断裂、错位、滑移等都为传感器电阻的快速变化提供了理论基础。张莹莹课题组先后用 Ecoflex 封装碳化棉布制备出了具有高性能的可穿戴的应变传感器,其最大灵敏度可达 64,并且可以检测 0.02%的微小应变[12];采用 Ecoflex 封装具有经纬不同捻度的碳化丝布制备了高弹性的灵敏柔性应变传感器,碳化丝布在外力拉伸下形成了独特的岛与裂纹结构[13];此外,该课题组通过将中国传统宣纸进行碳化,制备了具有 120%应变和高达 248 灵敏度的柔性应变传感器[24]。胡立兵等人通过将自然木材碳化得到碳化海绵,而原本木材的微结构成为了碳化海绵的微结构[25]。俞书宏等人以纳米纤维为载体,制备了间苯二酚树脂海绵,并碳化得到碳化海绵,保留了原本的纤维结构用于应变传感[14]。因此,将蚕丝布碳化后得到的碳化丝布仍能保留原布的一些纤维结构特性并拥有一定的应用价值,本课题组已有将这种碳化丝布应用于葡萄糖传感以及 PH 传感的工作[26][27]。

结合以上两点,本文提出了一种以碳化捻度取向不同的平纹结构的蚕丝布后得到的碳纤维作为敏感传感层、Ecoflex 作为弹性封装层、液态金属铟镓合金与铜片作为电极来实现具有高灵敏选择性的二维柔性电阻式应变传感器。通过碳化保留的平纹结构使得碳纤维在纵向主轴方向上有捻,而在横向干扰方向上无捻。基于这样的传感膜制备出的柔性传感器既可以实现纵向主轴拉伸时破坏导电通路以实现灵敏传感,又可以减少横向拉伸对主要导电通路的影响从而减少横向干扰。最终制备的二维柔性电阻式应变传感器具有高灵敏($GF \sim 18$)和大应变检测范围($\geq 100\%$),高度的选择性($\Delta GF \sim 18$ 且灵敏度倍率达 100 倍以上),与同类工作相比取得较为优良的性能。该传感器结构设计与制备工艺简单,能够有效检测二维平面上应变的大小及方向,在人体可穿戴领域的应变传感检测方向上表现出一定的潜力。

2. 实验

实验所用材料:商用平纹组织丝布、EcoflexA、EcoflexB、液态金属铟镓合金、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜、铜片、铜导线及焊锡。

2.1. 平纹结构碳化丝布的制备

取平纹结构蚕丝布,裁剪至 $14 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 与石英板大小相同,用去离子水洗净后在 45°C 烘箱烘干,之后放置在石英板上送至管式炉。在通氮气环境下以 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升温至 350°C ,保温一个小时,再以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 900°C ,保温 2 个小时,获得保留有织物结构的碳化丝布。

2.2. 二维柔性电阻式应变传感器的制备

第一步,取 EcoflexA 与 B 各 1.5 g 以 1:1 质量比在塑料皿中充分混合,将混合液转移到 0.7 mm 深的玻璃模具中并以 $2 \text{ mm}/\text{s}$ 的速度刮涂均匀,静置 2 分钟后,放置在加热台上以 100°C 加热 30 分钟完成第一层的封装层。第二步,取制备好的平纹结构碳化丝布,在显微镜下观察捻度取向,确定取向后在玻璃板上用手术刀裁至 $3.5 \text{ cm} \times 0.6 \text{ cm}$ 。取两份铜胶带与 PET 裁剪至 $2 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$,贴合在碳化丝布的两端并重合 0.25 cm,使碳化丝布留出 3 cm 的敏感工作长度。完成后放置在第一层已经固化后的 Ecoflex 上,并用注射器在电极交界处涂抹铟镓液态合金,完成第二层的传感层。重复以上步骤,完成

第三层的封装层、第四层的传感层和第五层的封装层，其中第四层的碳布丝布与第二层相互垂直。完成后再配置均匀 Ecoflex 混合液转移至盖状模具中完成对液态金属的封装。最后将铜导线焊至铜胶带上，完成传感器制备。

2.3. 测试方法及设备信息

所有实验的电阻测量采用领擎科技(Linkzill)的孪盒完成，灵敏度测试中各个测试点在到达指定应变 10 s 后数值稳定后读数，稳定性测试采用了程控电机进行循环拉伸，拉伸速度为 5 mm/s。

碳化丝布的微观形貌分别通过在 Zeiss Ultra Plus 场发射扫描电子显微镜和上海蔡康光学仪器的光学显微镜进行表征。

3. 结果与讨论

3.1. 二维柔性电阻式应变传感器的结构及其制备工艺设计

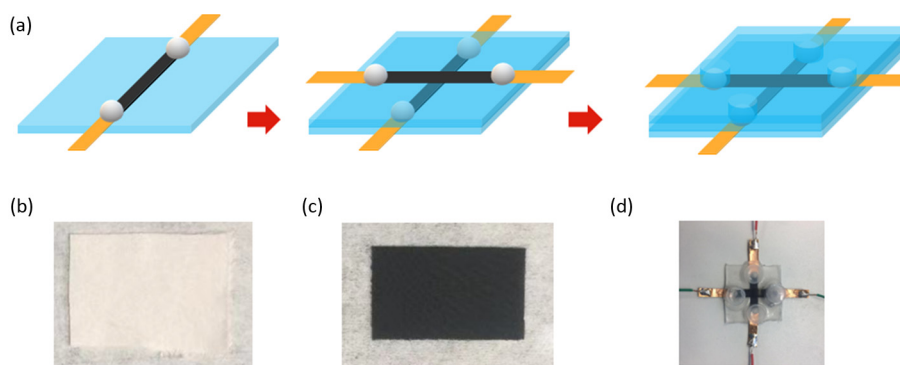


Figure 1. (a) Process figure and optical photograph of two-dimensional flexible resistance strain sensor; (b) silk cloth; (c) carbonized silk fiber; (d) sensor device

图 1. (a)二维柔性电阻式应变传感器的制备流程图和光学照片; (b)蚕丝布; (c)碳化丝布; (d)传感器器件

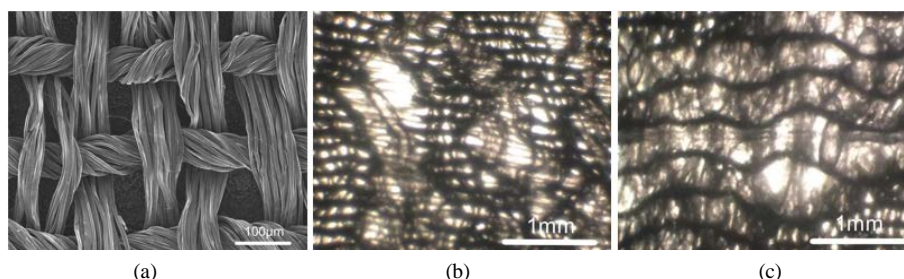


Figure 2. Characterization of carbonized silk fiber with plain texture (a) SEM image of carbonized silk fiber without stretching; (b) microscope optical photo of 100% stretching along twisted helical fiber at an Angle of 0°; (c) microscope optical photo of 100% stretching along untwisted parallel fiber at an Angle of 90°

图 2. 平纹结构的碳化丝布表征(a)未被拉伸的碳化丝布的 SEM 图像; (b) 0° 夹角下沿着有捻螺旋纤维 100% 拉伸下的显微镜光学照片; (c) 90° 夹角下沿着无捻平行纤维 100% 拉伸下的显微镜光学照片

图 1(a)为二维柔性电阻式应变传感器的制备流程，整个传感器一共分为 5 层，制备流程由底部向上进行，其中 1、3、5 层为弹性封装层，用于提供弹性基底和保护敏感传感层，由 Ecoflex 在模具中加热固化形成，2、4 层为敏感传感层，由传感材料碳化丝布和电极构成，电极由用液态金属连结的铜片和外部

焊接的铜线构成，传感层相互正交以分别检测各自所在方向的应变。图 1(b)为购买的具有特定结构的蚕丝布的光学照片，图 1(c)为经过管制炉碳化后得到的碳化丝布，图 1(d)为制备好的传感器实物图。

3.2. 平纹碳化丝布的拉伸表征

为了解平纹结构碳化丝布作为敏感层的应变传感器的工作原理，我们对不同方向拉伸状态下的碳化丝布进行了结构表征。图 2(a)为碳化丝布的 SEM 照片。照片中可以看出横向的纤维为有捻纤维成螺旋状聚在一起成一根大纤维，而纵向的纤维为无捻纤维成平行状相对更为散落。图 2(b)为 0° 夹角拉伸下碳化丝布的显微镜光学照片，照片中的拉伸方向为横向，与有捻的螺旋纤维同向。从照片中观察到，在外界拉力的作用下有捻的螺旋纤维被破坏，形成了局部的空白区域，此时原本以螺旋纤维为主的导电路径被改变，需要通过纵向的平行状纤维来绕过空白区域，这一过程导致了传感器电阻的增加；当拉力撤去，空白区域消失，螺旋纤维的断裂部分重新连接，电阻回归初始值。图 2(c)为 90° 夹角拉伸下碳化丝布的显微镜光学照片。照片中的拉伸方向为纵向，与无捻的平行纤维同向，在垂直方向下进行拉伸，作为构成导电路径的螺旋纤维的结构并没有被大幅度破坏形成空白区，电阻的变化主要由大纤维的扭曲引起。由这一原因引起的电阻变化相比断裂引起的电阻变化并不在同一数量级，因此起到了灵敏选择防干扰的效果。

3.3. 二维柔性电阻式应变传感器的灵敏选择性测试

为了验证具有捻度取向不同的碳化丝布可以实现对应变的方向选择，我们制备并表征了二维柔性应变传感器，在 5 个不同角度下进行不同应变的拉伸测试，传感器在不同的拉伸角度下表现出了灵敏度梯度。图 3 为不同方向角度下二维柔性电阻式应变传感器的拉伸特性曲线，黑色与红色分别代表 x 轴向与 y 轴向的传感器的电阻变化率，表 1 为双轴灵敏度及其差值比值汇总，图 4 为表 1 的数据比较。通过特性曲线以及表格的数据，可以看出该传感器在不同的拉伸角度下表现出了不同的灵敏响应，GF 随角度从 0° 的 18 左右依次减少到 30° 的 10 左右、 45° 的 5.6 左右、 60° 的 1.3 左右以及 90° 下的几乎为 0，具有较为明显的区分度， 0° 与 90° 的正交方向下更是有 100 倍以上的灵敏度比值，这证明器件在进行二维应变测量的过程中，在正交方向上几乎没有产生干扰影响，说明该传感器具有较好的选择性，验证了上文中提出的材料捻度取向不同导致导电路径受应变影响程度不同的猜想。另外，除去 90° 方向下受材料泊松比的影响较大的情况，其余的方向拉伸下传感器的传感特性表现出较好的线性 ($R^2 > 0.99$)；我们猜想这是由于碳化丝布在受拉伸前即为一个宏观整体的缘故，拉伸后均匀形成空白区域，可行导电路径减少，电阻平稳增加；而本身非宏观整体的材料在拉伸中电阻的增加是基于接触电阻间隔距离增加的缘故，因而往往是指数型变化。高线性这使得传感器在进行二维应变测量的过程中在先通过灵敏度比值确定应变角度的基础上可以较为准确的确定应变的大小。同时，该传感器可以承受高达 100% 的应变检测，这几乎覆盖了人体表面常见应变范围，其原因一方面是电阻随应变拉伸的平稳增加使得器件难以产生完全断路的情况，另一方面是具有高弹性范围的 Ecoflex 的有效封装缓解了敏感层材料的过早崩坏。表 2 总结了本工作与已经发表的二维柔性电阻式应变传感器工作的器件性能对比，可以看出，目前已有的工作的工作范围都难以超过 60%，几乎不具备线性，灵敏度在 20~40，且均具有不错选择性。与已发表的工作相比，本工作具有较高的工作范围(100%)、优秀的线性(除去 90° 其余 $R^2 > 0.99$)和优良的选择性 ($GF_x/GF_y > 100$)，且器件结构简单，制备工艺简易，是人体表面如手、脖颈、肘、膝盖等复杂应变检测中的一种具有参考价值的方法。

以不同角度下灵敏度差异大这一特点为基础，本文制备的二维柔性电阻式应变传感器可以对二维平面内应变进行方向与大小的传感。在传感测量中，首先根据 x 轴与 y 轴传感电阻变化的灵敏度的比值确

定此时的应变方向，在根据该方向上传感器所表现出的灵敏度与实际电阻变化确定应变大小，从而可以实现二维平面上的应变传感。

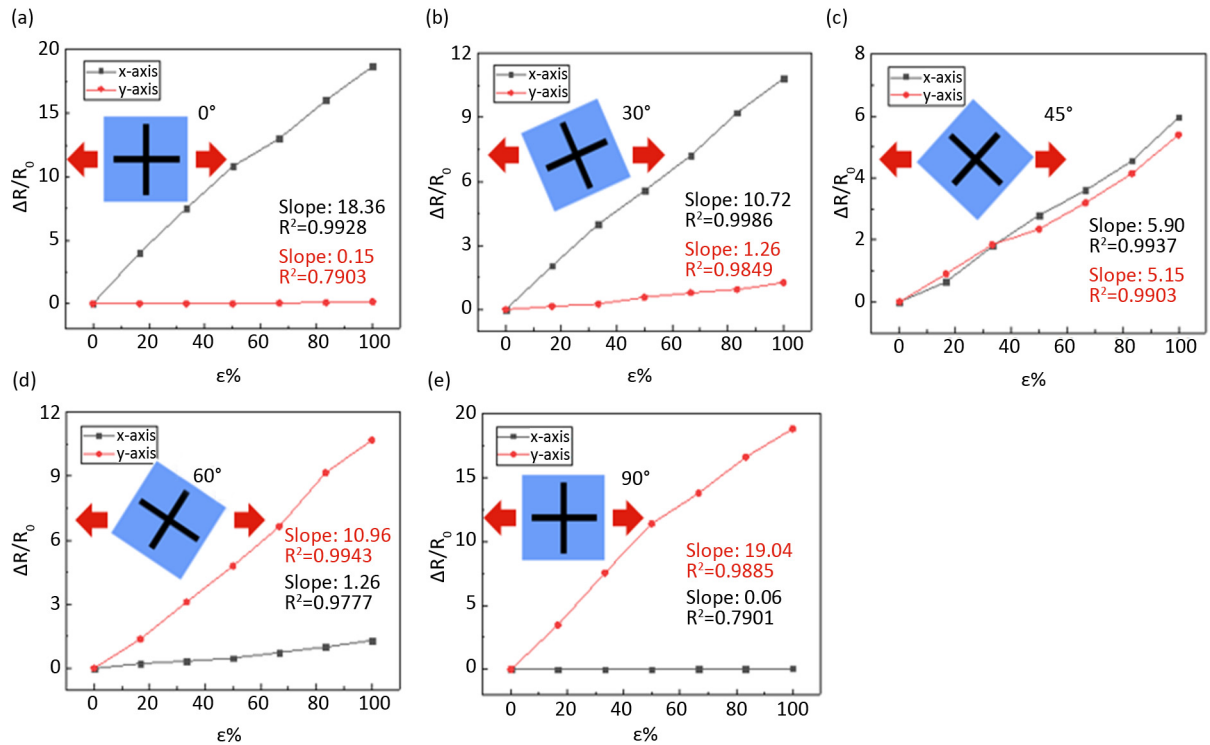


Figure 3. Sensitive characteristic curves of two-dimensional flexible resistance strain sensor at different angles. Tensile testing directions are (a) 0°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 90° with the angle of X-axis respectively

图 3. 二维柔性电阻式应变传感器的不同角度灵敏特性曲线，拉伸测试方向分别与 x 轴夹角成(a) 0°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 90°

Table 1. Sensitivity of different angles of two-dimensional flexible resistance strain sensors

表 1. 二维柔性电阻式应变传感器的不同角度灵敏度

角度	GF _x	GF _y	ΔGF	GF _x /GF _y
0	18.70	0.15	18.55	126
30	10.83	1.26	9.57	8.57
45	5.96	5.40	0.56	1.10
60	1.30	10.68	-9.38	0.122
90	0.06	18.79	-18.73	3.41E-3

Table 2. Working comparison of two-dimensional flexible resistance strain sensors

表 2. 二维柔性电阻式应变传感器工作对比

材料	工作范围	灵敏度	选择性	线性	参考文献
AgNW/PDMS	35%	20	正交方向电阻几乎不变	-	[21]
AgNW/SVS	60%	20	ΔGF = 20	-	[22]
石墨烯/PDMS	20%	42.2	正交方向电阻灵敏度略小	-	[23]
CSF/Ecoflex	100%	18.7	GF _x /GF _y > 100	R ² > 0.79	本工作

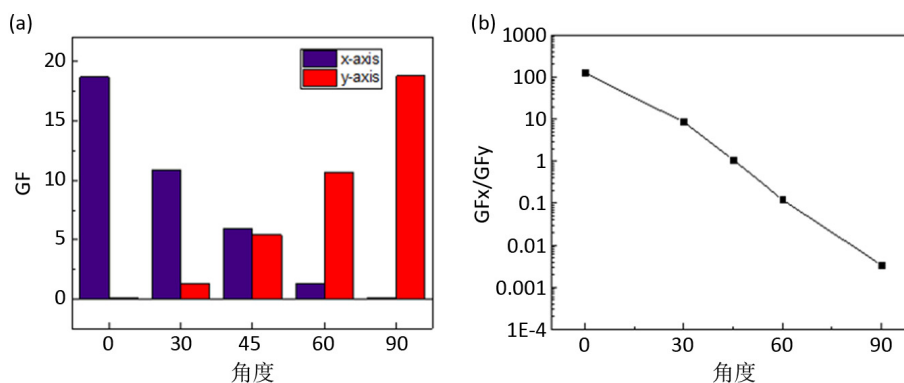


Figure 4. Sensitivity of two-dimensional flexible resistance strain sensor at various angles (a) comparison of sensitivity (b) curve of sensitivity ratio in logarithmic coordinates changing with angle

图 4. 二维柔性电阻式应变传感器的各角度下的灵敏度(a)灵敏度大小比较(b)对数坐标下的灵敏度比值随角度的变化曲线

3.4. 二维柔性电阻式应变传感器的稳定性测试

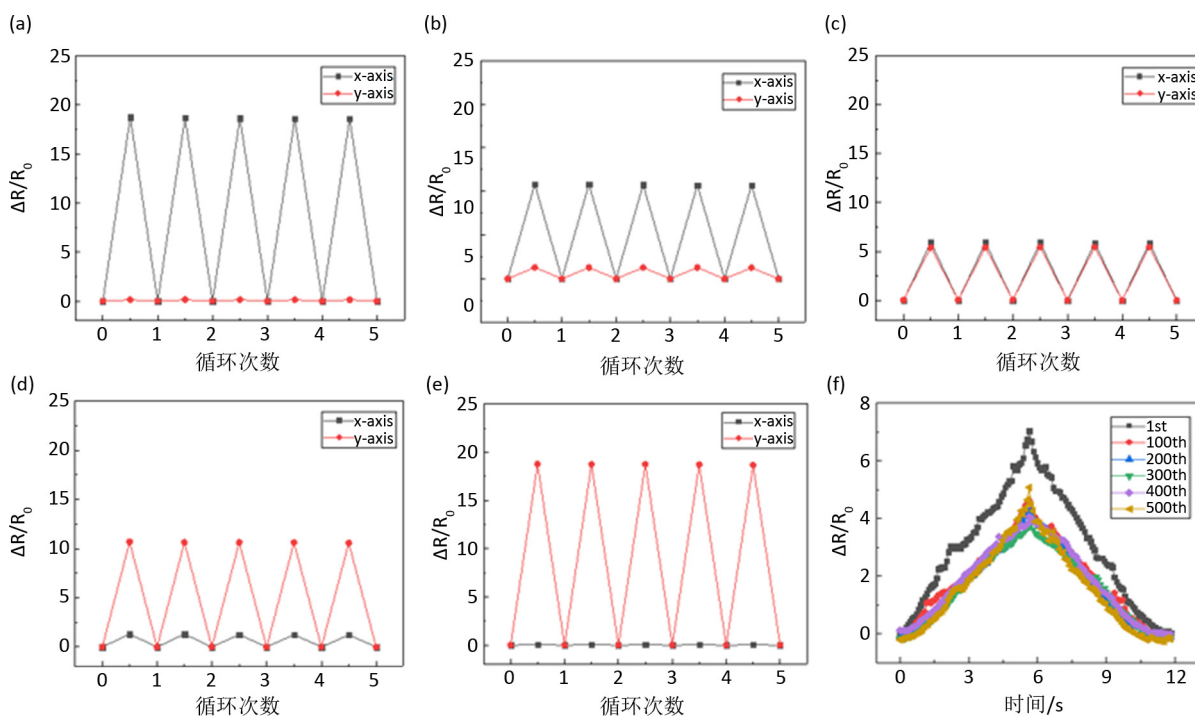


Figure 5. The cyclic tensile test results of the two-dimensional flexible resistance strain sensor. After the device is stabilized, the tensile test directions are (a) 0°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 90° at the angle of the X-axis at 100% strain, and (f) the cyclic tensile test results at 0° and 50% strain for 500 cycles

图 5. 二维柔性电阻式应变传感器的循环拉伸测试结果，器件稳定后在 100%应变下拉伸测试方向分别与 x 轴夹角成 (a) 0°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 90°的测试以及(f)0°下的 50%应变 500 周期循环拉伸

图 5 为二维柔性电阻式应变传感器的稳定性测试结果，器件在制备完成后首先要进行应变范围 100% 的 100 次预拉伸，目的是充分破坏纤维以在局部区域形成稳定的空白区域，从而可以得到一个初始电阻相对稳定的传感器。图 5(a)~(e)分别为与 x 轴夹角成 0°、30°、45°、60°和 90°的 5 次反复拉伸测试，黑色代表 x 轴的电阻变化，红色代表 y 轴的电阻变化，可以观察到，不论在哪一角度下进行反复拉伸，传感

器的初始电阻不会有明显的变化。在图 5(f)中的 500 次循环拉伸测试中, 除去前 10 个周期器件尚未达到稳定状态的情况, 其余周期器件的性能没有产生明显的衰减, 说明本文制备的传感器具有良好的工作稳定性。

4. 总结

本文提出了一种具有高灵敏选择性的二维柔性电阻式应变传感器, 可以实时检测平面应变的方向与大小。传感器的敏感传感层采用的是平纹结构的碳化丝布, 该碳布横向由有捻的螺旋状纤维与纵向的无捻的平行状纤维共同构成。在传感时, 有捻的螺旋纤维组成主要导电路径, 而无捻的平行纤维作为支路辅助导电。当应变方向在传感主轴时破坏螺旋纤维变为两种纤维共同导电, 改变导电路径并极大的引起了传感器的电阻变化, 而应变方向垂直于传感主轴时破坏平行纤维而导电路径不发生变化, 传感器电阻几乎不变起到防干扰的作用。

基于该碳化丝布制备的传感器具有至少 100% 高应变范围的且 $GF = 18.7$ 的主轴灵敏度, 且具有高度的传感选择性和传感线性用于支持同时表征应变的大小与方向。此外, 该传感器具有良好的机械和电气稳定性, 在 500 次的循环加载卸载稳定测试中没有明显的性能衰减。

致 谢

感谢上海交通大学仪器分析中心和上海交通大学先进电子材料与器件(AEMD)的材料表征。

参考文献

- [1] Amjadi, M., Pichitpajongkit, A., Lee, S., Ryu, S. and Park, I. (2014) Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire-Elastomer Nanocomposite. *ACS Nano*, **8**, 5154-5163. <https://doi.org/10.1021/nn501204t>
- [2] Hwang, B.U., Lee, J.H., Trung, T.Q., Roh, E. and Lee, N.E. (2015) Transparent Stretchable Self-Powered Patchable Sensor Platform with Ultrasensitive Recognition of Human Activities. *ACS Nano*, **9**, 8801-8810. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b01835>
- [3] Su, D., Jiu, J., Gao, Y., Tian, Y. and Uchida, H. (2016) One-Step Fabrication of Stretchable Copper Nanowire Conductors by a Fast Photonic Sintering Technique and Its Application in Wearable Devices. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 6190-6199. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b10802>
- [4] Lee, S., Shin, S., Lee, S., Seo, J., Lee, T., Son, S., *et al.* (2015) Ag Nanowire Reinforced Highly Stretchable Conductive Fibers for Wearable Electronics. *Advanced Functional Materials*, **25**, 3114-3121. <https://doi.org/10.1002/adfm.201500628>
- [5] Wu, X., Han, Y., Zhang, X., Zhou, Z. and Lu, C. (2016) Large-Area Compliant, Low-Cost, and Versatile Pressure-Sensing Platform Based on Microcrack-Designed Carbon Black@Polyurethane Sponge for Human-Machine Interfacing. *Advanced Functional Materials*, **26**, 6246-6256. <https://doi.org/10.1002/adfm.201601995>
- [6] Guo, Z., Li, Y., Zhou, B., Zheng, G., Liu, X., Li, T., *et al.* (2018) Continuously Prepared Highly Conductive and Stretchable SWNT/MWNT Synergistically Composites Electrospun Thermoplastic Polyurethane Yarns for Wearable Sensing. *Journal of Materials Chemistry C*, **6**, 2258-2269. <https://doi.org/10.1039/C7TC04959E>
- [7] Zhou, Y., Zhan, P., Ren, M., Zheng, G., Dai, K., Mi, L., *et al.* (2019) Significant Stretchability Enhancement of Crack-Based Strain Sensor Combined with High Sensitivity and Superior Durability for Motion Monitoring. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 7405-7414. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b20768>
- [8] Ryu, S., Lee, P., Chou, J. B., Xu, R., Kim, S.G., Hart, A.J., *et al.* (2015) Extremely Elastic Wearable Carbon Nanotube Fiber Strain Sensor for Monitoring of Human Motion. *ACS Nano*, **9**, 5929-5936. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b00599>
- [9] Shang, Y., He, X., Li, Y., Zhang, L., Li, Z., Ji, C., *et al.* (2012) Super-Stretchable Spring-Like Carbon Nanotube Ropes. *Advanced Materials*, **24**, 2896-2900. <https://doi.org/10.1002/adma.201200576>
- [10] Li, X., Sun, P., Fan, L., Zhu, M., Wang, K. and Zhong, M. (2012) Multifunctional Graphene Woven Fabrics. *Scientific Reports*, **2**, Article No. 395. <https://doi.org/10.1038/srep00395>
- [11] Xu, M., Qi, J., Li, F. and Zhang, Y. (2018) Highly Stretchable Strain Sensors with Reduced Graphene Oxide Sensing Liquids for Wearable Electronics. *Nanoscale*, **10**, 5264-5271. <https://doi.org/10.1039/C7NR09022F>

- [12] Zhang, M.C., Wang, C.Y., Wang, H.M., Jian, M.Q., Hao, X.Y., Zhang, Y.Y., (2017) Carbonized Cotton Fabric for High-Performance Wearable Strain Sensors. *Advanced Functional Materials*, **27**, e1604795. <https://doi.org/10.1002/adfm.201604795>
- [13] Wang, C., Li, X., Gao, E., Jian, M., Xia, K., Wang, Q., *et al.* (2016) Carbonized Silk Fabric for Ultrastretchable, Highly Sensitive, and Wearable Strain Sensors. *Advanced Materials*, **28**, 6640-6648. <https://doi.org/10.1002/adma.201601572>
- [14] Yu, Z.-L., Qin, B., Ma, Z.-Y., Huang, J., Li, S.-C., Zhao, H.-Y., *et al.* (2019) Superelastic Hard Carbon Nanofiber Aerogels. *Advanced Materials*, **31**, e1900651. <https://doi.org/10.1002/adma.201900651>
- [15] Pan, L., Chortos, A., Yu, G., Wang, Y., Isaacson, S., Allen, R., *et al.* (2014) An Ultra-Sensitive Resistive Pressure Sensor Based on Hollow-Sphere Microstructure Induced Elasticity in Conducting Polymer Film. *Nature Communications*, **5**, Article No. 3002. <https://doi.org/10.1038/ncomms4002>
- [16] Zheng, Y., Li, Y., Li, Z., Wang, Y., Dai, K., Zheng, G., *et al.* (2017) The Effect of Filler Dimensionality on the Electromechanical Performance of Polydimethylsiloxane Based Conductive Nanocomposites for Flexible Strain Sensors. *Composites Science and Technology*, **139**, 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.12.014>
- [17] Pu, J.H., Zha, X.J., Zhao, M., Li, S., Bao, R.Y., Liu, Z.Y., *et al.* (2018) 2D End-to-End Carbon Nanotube Conductive Networks in Polymer Nanocomposites: A Conceptual Design to Dramatically Enhance the Sensitivities of Strain Sensors. *Nanoscale*, **10**, 2191-2198. <https://doi.org/10.1039/C7NR08077H>
- [18] Choi, D.Y., Kim, M.H., Oh, Y.S., Jung, S.H., Jung, J.H., Sung, H.J., *et al.* (2017) Highly Stretchable, Hysteresis-Free Ionic Liquid-Based strain Sensor for Precise Human Motion Monitoring. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 1770-1780. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12415>
- [19] Wu, Y.H., Zheng, R.M., Liu, H.Z., Liu, S.Q., Deng, Z.F., Wang, P., *et al.* (2017) Liquid Metal Fiber Composed of Tubular Channel for High-Performance Strain Sensor. *Journal of Materials Chemistry C*, **5**, 12483-12491. <https://doi.org/10.1039/C7TC04311B>
- [20] Zhu, Y., Chao, C., Cheng, C.H. and Leung, W.F. (2009) A Novel Ionic-Liquid Strain Sensor for Large-Strain Applications. *IEEE Electron Device Letters*, **30**, 337-339. <https://doi.org/10.1109/LED.2009.2013884>
- [21] Kim, K.K., Hong, S., Cho, H.M., Lee, J., Suh, Y.D., Ham, J., *et al.* (2015) Highly Sensitive and Stretchable Multidimensional Strain Sensor with Prestrained Anisotropic Metal Nanowire Percolation Networks. *Nano Letters*, **15**, 5240-5247. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01505>
- [22] Ha, S.H., Ha, S.H., Jeon, M.B., Cho, J.H. and Kim, J.M. (2018) Highly Sensitive and Selective Multidimensional Resistive Strain Sensors Based on a Stiffness-Variant Stretchable Substrate. *Nanoscale*, **10**, 5105-5113. <https://doi.org/10.1039/C7NR08118A>
- [23] Chun, S., Choi, Y. and Park, W. (2017) All-Graphene Strain Sensor on Soft Substrate. *Carbon*, **116**, 753-759. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.02.058>
- [24] Xia, K., Chen, X., Shen, X., Li, S., Zhang, Y., Zhang, M., *et al.* (2019) Carbonized Chinese Art Paper-Based High-Performance Wearable Strain Sensor for Human Activity Monitoring. *ACS Applied Electronic Materials*, **1**, 2415-2421. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.9b00564>
- [25] Chen, C., Song, J., Zhu, S., Li, Y., Kuang, Y., Wan, J., *et al.* (2018) Scalable and Sustainable Approach toward Highly Compressible, Anisotropic, Lamellar Carbon Sponge. *Chem*, **4**, 544-554. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.12.028>
- [26] 梁晶, 奚馨, 纪伟, 刘瑞丽. 铂纳米颗粒/碳化丝布用于柔性非酶的电化学葡萄糖传感器[J]. 材料科学, 2019, 9(11): 984-992. <https://doi.org/10.12677/MS.2019.911122>
- [27] 王来玉, 刘雄宇, 刘瑞丽. 聚苯胺/碳化丝布复合材料的制备及其用作 pH 传感的性能探究[J]. 材料科学, 2019, 9(5): 489-494. <https://doi.org/10.12677/MS.2019.95062>