

综述与专论

基于纳米材料的柔性应力传感器研究进展

季 超 桑胜波* 张 强 杜 怡 刘 艳

(太原理工大学信息与计算机学院微纳系统研究中心, 晋中 030600)

摘 要 随着各种纳米材料的应用, 柔性应力传感技术得到了大力发展, 刷新了人们对电子器件、传感器件及系统等形态和功能的认知。依据该技术制成的柔性应力传感器具有灵敏度高、灵活性强等特点, 在医疗、保健和监测等许多领域都有着广泛的应用和良好的发展前景。目前常用的纳米材料有金属纳米材料、碳纳米材料及聚合物纳米材料。综述了柔性应力传感器中常用纳米材料的分类及提高性能的方法, 从而进一步了解柔性应力传感器的发展。

关键词 柔性应力传感器, 金属纳米材料, 碳纳米材料, 聚合物纳米材料

Research progress of flexible strain sensor based on nanomaterial

Ji Chao Sang Shengbo Zhang Qiang Du Yi Liu Yan

(Micro-Nano System Research Center, College of Information and Computer,
Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600)

Abstract With the application of various nano-materials, flexible stress sensing technology has been vigorously developed, which refreshes people's knowledge of forms and functions of electronic devices, sensors and systems. Flexible strain sensors according to the technology have high sensitivity, flexibility and strong characteristics, and have a wide range of applications and good prospects for development in the medical, health care, monitoring and many other fields. At present, common nanomaterials are metal nanomaterials, carbon nanomaterials and polymer nanomaterials. The classification of nanomaterials commonly used in flexible strain sensors and methods for improving performance was overviewed to further understand the development of flexible strain sensors.

Key words flexible strain sensor, metal nanomaterial, carbon nanomaterial, polymer nanomaterial

随着电子技术的不断进步, 人们对发展高性能柔性传感器的需求也在不断增加, 在大应变下导体具有有效的响应和良好的导电性对于许多新的应用变得相当关键。为了能够满足这些需求, 具有高灵敏度、能够探测微弱压力、实现大面积、柔性、弹性及高的空间分辨率等性能指标成为应力传感器研究的一个重要发展方向。纳米技术是近几年崛起的一项高新技术, 在光电子、生物医用、纳米传感和纳米储能等诸多领域具有潜在的应用前景^[1-6]。基于纳米材料制成的柔性应力传感器近几年发展迅速^[7-8], 在运动传感器^[9-10]、可穿戴电子产品^[11-14]、机器人“皮肤”^[15-20]等方面有广泛应用。

柔性应力传感器的特征在于机械柔顺, 使其能

够弯曲和伸展而不会造成性能改变, 因此基底材料需具有柔韧、可延展、折叠、便于携带和可穿戴等特点。常见的柔性基底有纺织品、聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等, 其中 PDMS 由于机械性能好、化学性质稳定、热稳定性好等优势成为众多柔性基底中的首选, 应用最为广泛^[21-23]。

常见的柔性应力传感器工作原理有压阻式、电容式、压电式及摩擦式。压阻式柔性应力传感器由于其灵敏度高、结构简单、检测范围宽、易于小型化与集成化而被广泛研究。因此, 笔者主要介绍了压阻式柔性应力传感器。

压阻式柔性应力传感器的原理是压阻效应, 即

基金项目: 国家自然科学基金(61471255 和 51622507)

作者简介: 季超(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性应力传感器。

联系人: 桑胜波, 教授。

当传感器受力形变时,内部材料的电阻值会随形变产生规律性变化,通过电阻的变化进行量化,进而反应所受应力的大小及变化。因此内部材料的选用十分重要。柔性应力传感器中使用的纳米材料按材料种类主要分为金属纳米材料、碳纳米材料及聚合物纳米材料。结合本课题组之前的研究,笔者主要论述了基于不同类型纳米材料的柔性应力传感器的制作方法与性能研究及提高传感器性能的方法,并对柔性应力传感器的发展作了总结与展望。

1 金属纳米材料

1.1 柔性应力传感器中常用的金属纳米材料

在柔性应力传感器中,常用的金属纳米材料有金属纳米线与金属纳米粒子。其中金属纳米线的应用更为广泛,主要包括银纳米线(AgNWs)、金纳米线(AuNWs)、铜纳米线(CuNWs)等。

CuNWs 价格低、导电率高,但制造条件苛刻,例如高温、还原环境及转移步骤耗时。Ding 等^[24]开发了在室温下空气中简单快速的一步法光子烧结技术,在聚氨酯(PU)上制备可拉伸的 CuNWs。CuNWs/PU 导体的表面电阻为 $22.1\Omega/\text{sq}$,在 10% 应变下拉伸/释放 1000 次循环之后,仍可保持低的表面电阻,可用于检测手指和关节的运动。AuNWs 不同于 CuNWs,它结合了高机械灵活性和高导电性。Gong 等^[25]研究了一种通用滴注的方法,可在任何柔性基底(乳胶橡胶、共聚酯和 PDMS 等)上制造 $1.64\mu\text{m}$ 的薄黑金膜。制成的可高度伸展的柔性应力传感器,可检测到小至 0.01%、高达 350% 的应变,应变系数(GF)为 6.9~9.9,快速响应($<22\text{ms}$),在 5000 个周期内加载-卸载信号变化小至可忽略。

AgNWs 因其导电性优异、表面电阻低和透明度高特点逐渐成为研究重点。Sun 等^[26]用被还原的铂将乙二醇中的 Ag^+ 还原成 Ag,加入聚乙烯吡咯烷酮(PVP)使其生长为均匀的 AgNWs。Chen 等^[27]利用溶剂热法控制 AgNWs 直径,将 AgNO_3 、 FeCl_3 和 PVP 的混合乙二醇溶液放入反应釜中,在 160°C 下加热 2.5h,制备出高长径比的 AgNWs。Xu 等^[28]同样利用溶剂热法合成了尺寸形貌均匀的 AgNWs。Wei 等^[29]将 AgNWs 涂在棉片上,在天然棉纤维表面形成 AgNWs 导电网络,得到的导电棉片具有非常高的灵敏度(3.4kPa^{-1}),快速响应和松弛时间($<50\text{ms}$)以及优异的稳定性(>5000 次装载/卸载循环)。Akter 等^[30]用聚多巴胺修饰 PDMS,使其疏水表面具有亲水性,随后喷涂

AgNWs 溶液,沉积在亲水的 PDMS 表面上,该透明电极的电导率保持高达约 20% 的机械拉伸。Yao 等^[31]使用 AgNWs 电极和共聚酯(Ecoflex)作为电介质,利用电容式感测机制,制备的传感器具有快速响应时间($<40\text{ms}$)和良好的压力映射功能,可检测应变(高达 50%),压力(高达 1.2MPa)。本课题组制作了基于夹层结构的 AgNWs/PDMS 柔性应力传感器^[32],该传感器具有较高的应变系数($\text{GF}=547.8$)且拉伸性可从 0.81% 到 7.26%,显示出较高的压阻特性,可以用其检测手指运动。

基于单一金属纳米材料制成的柔性应力传感器具有导电性高、响应快速的特点,在重复性、灵活度高等方面还有待提升。不同金属纳米材料的复合及改进传感器形貌会使柔性应力传感器的性能更为优越。

1.2 金属复合材料及改变传感器形貌对性能的影响

CuNWs 对氧气非常敏感,这极大阻碍了它们的发展。Wei 等^[33]研究了一种具有花瓣模型的微结构 Cu-Ag 核-壳纳米线电子皮肤。通过电化学反应,在 CuNWs 表面覆上银纳米粒子。该电子皮肤表现出高灵敏度(1.35kPa^{-1}),极低的检测限($<2\text{Pa}$),非常快的响应时间和松弛时间(36ms 和 30ms)以及良好的稳定性(超过 5000 个周期)。该高性能电子皮肤在语音识别、手腕脉搏监测和压力空间分布检测方面有广泛的应用。

Gong 等^[34]将浸入了超薄 AuNWs 的棉纸夹在 PDMS 膜和具有交错电极阵列的 PDMS 膜之间,制成可穿戴压力传感器,发现其可以在低功耗($<30\mu\text{W}$)的 1.5V 电池电压下工作,检测低至 13Pa 的按压力,具有快速响应时间($<17\text{ms}$)、高灵敏度($>1.14\text{kPa}^{-1}$)和高稳定性(>50000 个装载-卸载循环)。Huang 等^[35]制造的 AgNWs/PDMS 纳米复合膜通过原始预应变和后嵌入(PSPE)工艺制成,该薄膜在大的拉伸应变下显示出非常高的电导率,为 $1.52\times 10^4\text{S/cm}$,并具有优异的电稳定性和较小的电阻波动;且基于 AgNWs 和 PDMS 基材之间的牢固粘附性,可直接机洗。

通过将多种金属纳米材料复合及对基底进行预拉伸、将基底图案化等改进传感器形貌的方法,柔性应力传感器的性能如响应时间、稳定性及灵敏度等方面有了很大提高。

2 碳纳米材料

2.1 柔性应力传感器中常用的碳纳米材料

在纳米材料中,碳纳米材料是制备柔性应力传

传感器的理想材料之一,主要有碳纳米管(CNTs)、炭黑(CB)、石墨烯(GP)及碳纳米纤维等,其中 CNTs 与石墨烯在柔性应力传感器中应用广泛。

石墨烯具有轻薄、导电导热性好等特点,已成为替代传统材料(如 CB)的新型材料,在传感技术、信息技术等方面具有广阔的应用前景。Filippidou 等^[36]研究了低成本、易于实现、使用逐层旋涂的快速方法,制造石墨烯纳米片/PDMS(GNP/PDMS)电容式应力传感器,对小应变($\leq 0.2\%$)电容呈现线性变化。Kenry 等^[37]开发了一种新型氧化石墨烯(GO)纳米混悬浮微流控柔性应力传感器,装置非常灵活,能够承受多种变形模式,并可区分使用者施加的各种机械力,包括挤压、拉伸和弯曲。

CNTs 具有结晶度高、导电性好、比表面积大等优点,且微孔大小可通过合成工艺加以控制,硬度与金刚石相当,却拥有良好的柔韧性,可以拉伸。1991 年, Iijima^[38]发现了 CNTs,之后科研人员都在各种纳米复合材料和各类传感器中使用 CNTs。Maune 等^[39]以 PDMS 为基底,使单壁碳纳米管(SWCNTs)发生应变并调节其电子性质以开发可检测局部应变的柔性材料,这个微米级纳米管器件可通过高达 20% 的应变重复循环。Park 等^[40]以聚环氧乙烷(PEO)为聚合物基体,研究了多壁碳纳米管(MWCNTs)/聚合物复合膜的应变依赖性电阻特性。Lipomi 等^[41]研究了导电单层碳纳米管喷涂膜,可以通过沿每个轴施加应变使其拉伸,然后释放该应变,该过程在纳米管中产生弹簧状结构,使其可适应高达 150% 的应变,并且在拉伸状态下显示出 2200 S/cm 的电导率。Yamada 等^[42]研究了一类由对齐的 SWCNTs 薄膜制成的可穿戴和可拉伸装置。当拉伸时,纳米管薄膜断裂成间隙和岛状物,以及桥接间隙的束。这种机制允许膜作为应变传感器,能够测量高达 280% 的应变(为常规金属应变计的 50 倍),具有高耐久性、快速响应和低蠕变性。Cohen 等^[43]提出了一种高弹性应变计,它基于由介电弹性体隔开的平行碳纳米管基渗透电极,在高达 100% 的应变下具有可靠的线性性能,具有低于 3% 的变化率。

碳纳米材料良好的性能使基于它制成的柔性应力传感器具有高灵敏度、拉伸性与稳定性,但在导电性方面还有待改进。

2.2 碳复合材料及改变形貌对传感器性能的影响

改变传感器的结构可提高传感器性能。Jung 等^[44]研究了具有褶皱结构可拉伸 CNTs/PDMS 薄

膜的压阻特性,规格因子在 0.19~1.16 范围内。即使在大伸长率($\sim 55\%$)下,样品也显示出良好的导电性,并且在小应变($\sim 11\%$)以及大应变下的循环压阻实验中具有优异的性能。Wang 等^[45]将 PU 与棉混纺的包芯纱浸渍于 SWCNTs 溶液中,烘干后制成具有高可靠性和高拉伸性的柔性应力传感器。由于 PU/棉包芯纱的覆盖结构和 SWCNTs 的增强效果,复合纱可承受高达 300% 的应变,并且在 40% 应变下可以循环近 30 万次拉伸,而没有明显的断裂。该复合纱能够检测和监测人体四肢的运动,如手指和肘部,甚至眼睛的眨动。

不同碳纳米材料的混合也能提高传感器的性能。Guo 等^[46]研究了 SWCNTs/CB 协同传导网络的高度可拉伸的柔性应力传感器。该传感器具有高拉伸性(120%)、优异的柔韧性、快速响应($\sim 60\text{ms}$)以及在约 1100 个拉伸/释放循环期间具有优异稳定性和再现性。Zheng 等^[47]研究了 CNTs-CB/PDMS 复合材料柔性应力传感器,应变检测范围(约 300% 应变)下具有高拉伸性,在拉伸释放循环过程中,也具有良好的重复性、稳定性和耐用性(在 200% 应变下 2500 次循环)。

碳纳米复合材料的使用与褶皱结构、包芯纱的使用使基于碳纳米材料的传感器重复性极大提升,扩大了传感器的应用范围,但对提高导电性的影响小。

3 基于金属纳米材料与碳纳米材料的复合材料传感器

将金属纳米材料与碳纳米材料混合,可结合两种材料的优势,从而更大程度地提高传感器性能。Woo 等^[48]在 Ecoflex 基底上形成了 AgNWs/SWCNT 高性能可拉伸混合膜。在不需要预应变的情况下,该薄膜在 480% 以上的拉伸应变下具有良好的电学和机械稳定性。CuNWs 极易氧化,这极大限制了它们的实际应用,Zhu 等^[49]研究了一种简单和新颖的方法,通过使用真空过滤工艺将 CuNWs 嵌入水分散改性石墨烯(WGP)片中以形成均匀的混合导电膜来减轻 CuNWs 的氧化。使用这种导电混合膜,制造了三明治结构的 PDMS/CuNWs-WGP/PDMS 柔性应力传感器,在 450 次机械弯曲下电导率损失小于 15%,展现出良好的柔韧性和可拉伸性。Han 等^[50]在用嘧啶酮(UPy)修饰的 CNTs 和石墨烯表面形成 Ag 纳米带,随后使用合成的碳纳米材料/Ag 纳米带杂化材料来制造高耐受应变传感器。

4 聚合物纳米材料

目前,为了将柔性应力传感器应用于纺织物上,提高应用范围,有些柔性应力传感器使用聚合物纳米材料,常见的有聚合物纳米纤维。聚合物纳米纤维的用途很广,如将其植入织物表面,可形成一层稳定的薄膜,制成双疏性界面织物,既可防水,又可防油、防污。

Mandal 等^[51]研究了聚偏氟乙烯-三氟乙烯[P(VDF-TrFE)],为将其应用于柔性应力传感器开辟了可能。Gao 等^[52]研究了基于聚(3-己基噻吩)(P3HT)的柔性应力传感器,通过监测电阻变化来检测压力变化和弯曲角度。Pang 等^[53]基于高纵横比铂(Pt)涂层聚合物纳米纤维的两个交错阵列,以 PDMS 薄膜为基底,设计了柔性应力传感器。该系统相比于其他系统,不需要复杂的集成纳米材料组件或分层阵列,从而为高性能、大面积应力传感器提供了简单、便宜且坚固的传感平台。可检测应力、剪切和扭转,具有高灵敏度和宽动态范围,通过多次循环测试(<10000 次循环),输出信号具有高度可重复性和重现性,在可穿戴电子设备或植入式医疗设备中具有应用潜力。

5 结论与展望

现阶段研究的柔性应力传感器大多数基于金属材料、碳纳米材料及聚合物纳米材料,金属材料具有高导电性、快速的响应时间,碳纳米材料具有高重复性与稳定性,将两类材料进行混合、改进传感器的结构如进行预拉伸、建立褶皱结构等可进一步提高传感器的性能。研究聚合物纳米纤维与纺织物的结合,可扩大传感器的实际应用范围。目前柔性应力传感器在电子皮肤、生物医药和可穿戴电子产品中有重要作用,已经应用到监测生命状况如脉搏与心跳等及可穿戴电子等方面。

面对越来越多的应用领域,柔性应力传感器的结构需灵活多样,能对特殊环境与特殊信号进行精确地测量,这就要求柔性应力传感器向一致性、小型化、集成化、智能化的方向发展。但目前对于金属纳米线、CNTs 等材料,柔性应力传感器的制备工艺水平还不成熟,也存在成本、适用范围、使用寿命等问题。在这些问题得到解决之后,柔性应力传感器才能更广泛地应用于军事、医学、航天等方面。

参考文献

[1] Wen M M, El-Salamouni N S, El-Refaie W M, et al. Nanotech-

nology-based drug delivery systems for Alzheimer's disease management; technical, industrial, and clinical challenges[J]. *Journal of Controlled Release*, 2017, 245: 95-107.

- [2] 张震,李莹,耿亚伟,等.纳米支架及合成技术在神经组织再生的应用[J].*口腔医学研究*, 2017, 33(4): 459-462.
- [3] Saidi T, Zeiss R. Investigating promises of nanotechnology for development; a case study of the travelling of smart nano water filter in Zimbabwe[J]. *Technology in Society*, 2016, 46: 40-48.
- [4] Sakhnini S. The making of nanotechnology: exposing high-school students to behind-the-scenes of nanotechnology by inviting them to a nanotechnology conference; nanotechnology reviews[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2015, 4(1): 103-116.
- [5] 高广宇,陈美玲,李明媛,等.纳米技术转化医学发展现状及前景展望[J].*药学报*, 2015, 50(8): 919-924.
- [6] He X, Hwang H M. Nanotechnology in food science: functionality, applicability, and safety assessment[J]. *Journal of Food & Drug Analysis*, 2016, 24(4): 671-681.
- [7] Takei K, Takahashi T, Ho J C, et al. Nanowire active-matrix circuitry for low-voltage macroscale artificial skin[J]. *Nature Material*, 2010, 9(10): 821-826.
- [8] 安萍,郭浩,陈萌,等.碳纳米管/聚二甲硅氧烷复合薄膜的制备及力敏特性研究[J].*物理学报*, 2014, 63(23): 314-319.
- [9] Yi F, Lin L, Niu S, et al. Stretchable-rubber-based triboelectric nanogenerator and its application as self-powered body motion sensors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(24): 3688-3696.
- [10] Yang P, Lin L, Yi F, et al. A Flexible, Stretchable and shape-adaptive approach for versatile energy conversion and self-powered biomedical monitoring [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(25): 3817.
- [11] 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): 635-649.
- [12] Matsuzaki R, Tabayashi K. Wearables: highly stretchable, global, and distributed local strain sensing line using GaInSn electrodes for wearable electronics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(25): 3797.
- [13] Brock H, Ohgi Y, Seo K. Development of an automated motion evaluation system from wearable sensor devices for ski jumping[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 147: 694-699.
- [14] 辛毅,郭超,凌振宝,等.基于压电薄膜传感器的穿戴式健康监测体域网系统[J].*国防科技大学学报*, 2016, 38(6): 161-167.
- [15] Trung T Q, Lee N E. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4338.
- [16] Jeon H, Hong S K, Cho S J, et al. Development of an integrated evaluation system for a stretchable strain sensor [J]. *Sensors*, 2016, 16(7): 1114.
- [17] Jeong Y R, Park H, Jin S W, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensors using fragmented graphene foam [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(27): 4228-4236.
- [18] 蔡倩文,王金凤,陈慰来.纬编织柔性传感器结构及其导电性能[J].*纺织学报*, 2016, 37(6): 48-53.
- [19] Koch E, Dietzel A. Skin attachable flexible sensor array for respiratory monitoring [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2016, 250: 138-144.

- [20] Kwak Y H, Kim W, Park K B, et al. Flexible heartbeat sensor for wearable device[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2017, 94: 250-255.
- [21] Pal R K, Pradhan S, Narayanan L, et al. Micropatterned conductive polymer biosensors on flexible PDMS films[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2018, 259: 498-504.
- [22] Li J, Xie Y, Lu W, et al. Flexible electromagnetic wave absorbing composite based on 3D rGO-CNT-Fe₃O₄ ternary films[J]. *Carbon*, 2018, 129: 76-84.
- [23] Cui Z, Han Y, Huang Q, et al. Electrohydrodynamic printing of silver nanowires for flexible and stretchable electronics[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(15): 6806-6811.
- [24] Ding S, Jiu J, Gao Y, et al. One-step fabrication of stretchable copper nanowire conductors by a fast photonic sintering technique and its application in wearable devices[J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(9): 6190-6199.
- [25] Gong S, Lai D T H, Su B, et al. Highly stretchy black gold E-skin nanopatches as highly sensitive wearable biomedical sensors[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2015, 1(4): 1400063.
- [26] Sun Y, Gates B, Brian Mayers A, et al. Crystalline silver nanowires by soft solution processing[J]. *Nano Letters*, 2002, 2(2): 165-168.
- [27] Chen D, Qiao X, Qiu X, et al. Convenient synthesis of silver nanowires with adjustable diameters via a solvothermal method[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2010, 344(2): 286-291.
- [28] Xu L H, Kan C X, Wang C S, et al. Synthesis of Ag nanostructures with controlled shapes by a polyvinylpyrrolidone-assisted hydrothermal method[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2014, 30(3): 569-575.
- [29] Wei Y, Chen S, Lin Y, et al. Silver nanowires coated on cotton for flexible pressure sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(5): 935-943.
- [30] Akter T, Kim W S. Reversibly stretchable transparent conductive coatings of spray-deposited silver nanowires[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(4): 1855-1859.
- [31] Yao S, Zhu Y. Wearable multifunctional sensors using printed stretchable conductors made of silver nanowires[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(4): 2345-2352.
- [32] Liu L, Qiang Z, Zhao D, et al. Preparation and property research of strain sensor based on PDMS and silver nanomaterials[J]. *Journal of Sensors*, 2017, 2017(3): 7843052.
- [33] Wei Y, Chen S, Lin Y, et al. Cu-Ag core-shell nanowires for electronic skin with petal molded microstructure[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(37): 9594-9602.
- [34] Gong S, Schwalb W, Wang Y, et al. A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(2): 3132.
- [35] Huang G W, Xiao H M, Fu S Y. Wearable electronics of silver-nanowire/poly(dimethylsiloxane) nanocomposite for smart clothing[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13971.
- [36] Filippidou M K, Tegou E, Tsouti V, et al. A flexible strain sensor made of graphene nanoplatelets/polydimethylsiloxane nanocomposite[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 142(7): 7-11.
- [37] Kenry, Yeo J C, Yu J, et al. Highly flexible graphene oxide nanosuspension liquid-based microfluidic tactile sensor[J]. *Small*, 2016, 12(12): 1593-1604.
- [38] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. *Nature*, 1991, 354(6348): 56-58.
- [39] Maune H, Bockrath M. Elastomeric carbon nanotube circuits for local strain sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(17): 173131.
- [40] Park M, Kim H, Youngblood J P. Strain-dependent electrical resistance of multi-walled carbon nanotube/polymer composite films[J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(5): 055705.
- [41] Lipomi D J, Vosgueritchian M, Tee C K, et al. Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes[J]. *Nature nanotechnology*, 2011, 6(12): 788-792.
- [42] 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.
- [43] Cohen D J, Mitra D, Peterson K, et al. A highly elastic, capacitive strain gauge based on percolating nanotube networks[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(4): 1821-1825.
- [44] Jung J, Lee K M, Baek S H, et al. Piezoresistive behavior of a stretchable carbon nanotube-interlayered poly(dimethylsiloxane) sheet with a wrinkled structure[J]. *Rsc Advances*, 2015, 5(89): 73162-73168.
- [45] Wang Z, Huang Y, Sun J, et al. Polyurethane/cotton/carbon nanotubes core-spun yarn as high reliability stretchable strain sensor for human motion detection[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(37): 24837-24843.
- [46] Guo X, Huang Y, Zhao Y, et al. Highly stretchable strain sensor based on SWCNTs/CB synergistic conductive network for wearable human-activity monitoring and recognition[J]. *Smart Material and Structures*, 2017, 26(9): 095017.
- [47] Zheng Y, Li Y, Dai K, et al. A highly stretchable and stable strain sensor based on hybrid carbon nanofillers/polydimethylsiloxane conductive composites for large human motions monitoring[J]. *Composites Science & Technology*, 2018, 156(3): 276-286.
- [48] Woo J Y, Kim K K, Lee J, et al. Highly conductive and stretchable Ag nanowire/carbon nanotube hybrid conductors[J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(28): 285203.
- [49] Zhu Y, Hu Y, Zhu P, et al. Enhanced oxidation resistance and electrical conductivity copper nanowires-graphene hybrid films for flexible strain sensors[J]. *New Journal of Chemistry*, 2017, 41(12): 4950-4958.
- [50] Han J T, Jang J I, Cho J Y, et al. Synthesis of nanobelt-like 1-dimensional silver/nanocarbon hybrid materials for flexible and wearable electronics[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4931.
- [51] Mandal D, Yoon S, Kim K J. Origin of piezoelectricity in an electrospun poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) nanofiber web-based nanogenerator and nano-pressure sensor[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2011, 32(11): 831-837.
- [52] Gao Q, Meguro H, Okamoto S, et al. Flexible tactile sensor using the reversible deformation of poly(3-hexylthiophene) nanofiber assemblies[J]. *Langmuir*, 2012, 28(51): 17593-17596.
- [53] Pang C, Lee G Y, Kim T, et al. A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(9): 795-801.