



可穿戴光纤传感技术: 研究进展及未来机遇

赵磊[†], 谭颖玲[†], 李航, 陈锦辉^{*}

厦门大学电子科学与技术学院, 厦门 361005

*联系人, E-mail: jimchen@xmu.edu.cn

[†]同等贡献

收稿日期: 2023-02-03; 接受日期: 2023-04-17; 网络出版日期: 2023-10-23

国家自然科学基金(编号: 62005231)资助项目

摘要 近年来, 可穿戴柔性电子器件快速发展并日趋成熟, 广泛地应用在人体工程学、个性化医疗、电子皮肤、人机交互等领域. 然而, 传统电学传感器件具有容易受到电磁场干扰、不耐电化学腐蚀以及电气安全性等问题, 因此可穿戴柔性光纤传感器逐渐得到研究者关注, 与电学传感器研究形成良好的互补. 本文主要关注可穿戴光纤传感器件研究进展, 介绍氧化硅光纤和聚合物光纤这两大类光纤器件的光学传感原理、器件的材料和结构设计方法和光电信号处理技术, 以及简要评述在人体健康监测、人机界面等领域的应用, 并对未来发展趋势进行展望.

关键词 光纤传感, 可穿戴传感器件, 人体健康监测, 人机交互

PACS: 42.81.Pa, 42.79.-e, 85.60.Bt, 87.90.+y

1 引言

可穿戴传感技术自20世纪被提出以来, 在最近几年已经成为一个热门的研究领域, 这主要得益于微电子制造技术、人机工程学、远程医疗技术等的发展和消费电子设备的普及^[1,2]. 可穿戴传感系统最开始应用在医疗领域, 作为一种非侵入性的手段实现随时随地监测目标医疗人群的生理/生化信号^[3,4], 例如, 人体心跳、脉搏、体温、血压/眼压等物理信号监测以及血液、汗液、泪液、唾液等体液中的化学标志物检测, 因此它被视为下一代个性化医疗设备和远程医疗的基础. 欧盟委员会也提出了个人健康管理系统的(PHMS),

旨在利用信息技术建立个人与健康信息网络的连接, 提高个人参与管理自己的健康状况意识, 构建以人为本的健康系统, 包括预防、诊断和治疗等各个护理阶段^[5]. 基于可穿戴传感技术的个人健康护理正在改变着传统的医疗方式^[4-7], 丰富医疗资源并且提高医疗资源的利用率. 此外, 伴随着人工智能、虚拟现实、5G/6G等前沿技术的发展, 可穿戴传感系统的应用场景也得到极大的拓展, 在人体动作捕捉、语音识别、人机交互、互动娱乐等智能识别技术领域也逐渐得到研究者关注, 并且部分技术得到商业化应用^[8-12]. 早期大多数可穿戴检测设备是刚性监测器件, 生物相容性较差, 容易引发感染和二次伤害; 为了提高临床诊断使用过

引用格式: 赵磊, 谭颖玲, 李航, 等. 可穿戴光纤传感技术: 研究进展及未来机遇. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 114204
Zhao L, Tan Y L, Li H, et al. Wearable fiber-optic sensors: Recent advances and future opportunities (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 114204, doi: 10.1360/SSPMA-2023-0043

程中的舒适性以及实时健康监测, 基于柔性电子器件的可穿戴检测设备/系统得到快速发展^[2,7,13,14], 并且在电子皮肤^[13,15-18]、智能人机交互^[19-21]、人体健康监测^[2,22-24]等不同领域获得广泛的应用. 柔性电子传感器件典型组成包括柔性/可拉伸衬底、导电电极、传感材料以及封装材料等, 选择合适的弹性基底和传感材料对器件的构建非常重要: 弹性聚合物、硅橡胶和金属薄膜是重要的衬底材料, 而碳纳米材料(碳纳米管和石墨烯)^[25-28]和金属/半导体纳米线^[29,30]是广泛使用的导电电极和传感材料. 在传感机制方面, 电阻式和电容式的电子传感元件最为常见; 此外, 为了提高柔性电子设备的便携性和灵活性, 基于摩擦起电、压电效应、热释电等实现自供电的传感结构得到研究者的重视^[31-34].

尽管可穿戴柔性电子器件已经获得长足的发展, 然而由于内禀结构和传感机制的限制, 传统的电学传感器难以工作在复杂环境中, 例如它们容易受到电磁场干扰和不耐电化学腐蚀^[35,36]. 近年来, 基于光学波导(光纤)的可穿戴传感器件逐渐得到研究者重视, 与电子器件相比, 光学传感器件具有抗电磁干扰、电气安全优势, 并且光学信号内禀地具有传输带宽大、可复用、调制解调多样化(强度、相位、波长、偏振)等特点^[35-40], 特别是在多自由度传感体系更是展现了诱人的应用前景^[41,42]. 目前, 可穿戴光纤传感器件主要包括氧化硅和聚合物两类基底材料: 氧化硅光纤具有超低损耗的光学传输(0.2 dB/km @1550 nm)与光学损伤阈值高、光学透明窗口范围大(紫外到近红外波段)、化学惰性、制备工艺成熟成本低的特点. 然而由于氧化硅材料杨氏模量很大(~70 GPa), 与生物组织机械性能失配度较大, 并且可拉伸形变范围小(<1%), 一般需要通过几何结构的设计来提高器件的可拉伸性能^[43,44]. 近年来, 微纳光纤研究的兴起, 为传统可穿戴光纤传感技术注入新的活力, 特别是在传感器件的小型化和探测灵敏度等方面取得了许多重要进展^[37,38,45,46]. 聚合物光纤则具有柔性、可拉伸性(形变>100%)以及生物兼容性, 并且有些聚合物可以生物降解, 在人体嵌入式传感方面具有重要应用价值; 此外, 聚合物光纤容易掺杂荧光分子、纳米颗粒等功能材料, 具有更大的光学调控自由度^[35,36,41], 需要注意的是聚合物光纤的传输损耗(~1 dB/cm)远大于氧化硅光纤. 本文主要介绍可穿戴光纤传感器件研究进展, 将围绕

氧化硅光纤和聚合物光纤这两大类光纤器件, 介绍其基本光学传感原理及器件的结构设计和材料调控方法以及在人体健康监测、人机界面等领域的应用(图1), 并对未来发展趋势进行展望.

2 可穿戴光纤传感器件研究进展

2.1 氧化硅光纤器件及应用

2.1.1 光纤光栅器件

标准的氧化硅光纤由高折射率掺杂芯层和低折射率纯氧化硅包层组成, 从几何光学角度, 通过界面处光全内反射效应实现对传播光场的束缚. 由于光场被约束在芯层传播, 标准光纤中光场与外界相互作用较弱, 为了实现高性能光学传感器件, 常用的方法是引入人工微纳结构来增强光-物质相互作用^[45,47]. 光纤布拉格光栅(FBG)是目前应用最广、商业化最成功的光纤传感器件, 光纤光栅传感技术具有传感信号强、可复用、精度高、不受光源波动影响等特点. 光纤光栅可以视为一维光子晶体结构, 制备方法一般是将芯层曝光在深紫外结构光场下, 利用掺杂芯层的光敏特性形成周期性的折射率分布^[48,49], 典型光栅长度为 10^{-1} – 10 cm, 调制的折射率为 10^{-5} – 10^{-3} ^[50], 该折射率的微扰引起芯层中前向和后向传输模式的耦合, 在相位匹配

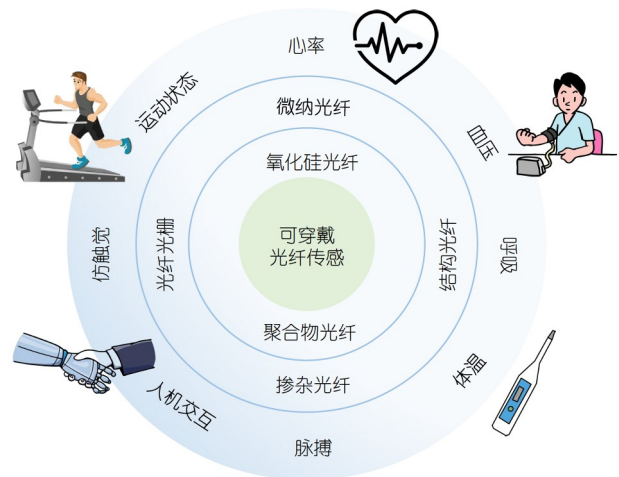


图1 (网络版彩图)可穿戴光纤传感材料组成、结构设计与应用. 图中光纤结构的分类仅适用于可穿戴光纤传感领域
Figure 1 (Color online) Wearable optical fiber sensors and their materials composition, structural design and applications. The classifications of fiber structures are only applicable in the wearable optical fiber sensors.

条件下, 其中心布拉格反射波长 λ_B 可以写为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

其中, n_{eff} 为有效折射率, Λ 为光栅周期. 由于光纤芯层有效折射率以及光栅周期会受到应变和温度的影响, 因此通过监测布拉格反射波长的移动, 可以实现对应变和温度的传感, 理论上光纤光栅反射波长的偏移 $\Delta\lambda_B$ 可以写为

$$\Delta\lambda_B = k_T\Delta T + k_\epsilon\Delta\epsilon, \quad (2)$$

其中, k_T , k_ϵ 分别为温度灵敏系数和应变灵敏系数, 典型的 k_T 值为10 pm/°C (@1550 nm), 而 k_ϵ 值为1.2 pm/ $\mu\epsilon$ (@1550 nm)^[50]. 常见的光纤光栅解调系统如图2(a)和(b)所示^[51], 其中图2(a)采用宽带光源, 通过光开关切换光路, 从而实现时域上复用测量, 这种测量方式波长分辨率取决于光谱仪的衍射光栅分辨率, 一般而言波长分辨率约为100 pm^[51]; 而图2(b)采用的光源为可调谐激光器, 通过数字信号采集系统同步波长扫描与光电探测实现光谱测量, 这种测量方式波长分辨率取决于激光波长扫描精度, 一般而言在100 nm光谱范围内可以达到5–10 pm波长分辨率^[51]. 最近, Guo等人^[43]报道了基于自由运转双光梳光纤激光的解调系统, 如图2(c)所示, 通过光纤光栅的光谱滤波、双光梳梳齿拍频和光电转换过程, 可以将光栅光谱信息转换为射频信号进行测量(图2(d)), 这种测量方法具有速度快、精度高等特点, 在高速信号解调场景下具有重要应用价值. 目前绝大多数基于光纤光栅的传感系统需要对波长信息进行解调, 而解调装置一般比较笨重, 对于人体可穿戴应用场景来说不够方便, 且价格昂贵. 近年来, 硅基光子学的发展为光学解调仪器小型化的发展提供了新的可能^[52]. 最近, Li等人^[53]实现了一个完全集成的可穿戴光学传感器解调方案, 如图2(e)和(f)所示; 他们利用片上集成的垂直腔面发射激光器(VCSEL)阵列作为光源, 阵列波导光栅(AWG)和片上的光电探测器阵列(图2(g))组成光纤光栅解调系统. 进一步地, 他们展示了该柔性集成器件连续采集人体生理信号的应用, 例如, 体温和心音; 结合蓝牙发射系统和智能手机, 该集成系统在便携式光学传感应用具有巨大的价值.

光纤光栅传感技术在建筑桥梁、井下石油、油气管道、轨道交通等安全监测领域中已经得到广泛应用, 近年来研究者也逐渐关注其在可穿戴光纤器件的

应用, 并在人体力学传感和心肺系统监测等方向上取得了许多重要进展^[54–56], 例如基于光纤光栅传感器的光机械和温度响应, 可以实现对人体体温、肢体弯曲、形变等多种物理量的监测. Abro等人^[57]将光纤光栅嵌入硅胶中制成柔性条带并绑在膝关节位置, 用于关节姿势的监测. 理论上, 膝关节动作引起周围肢体的拉伸与收缩, 使得负载的光纤光栅的受力状态发生改变, 从而引起光纤光栅反射波长的变化. 在静态测试条件下, 实验室测得光纤光栅对关节弯曲传感灵敏度为30 pm/°; 而在慢跑下, 器件的传感灵敏度则下降为21 pm/° (2 km/h)和18 pm/° (3 km/h). Li等人^[58]报道了柔性封装的光纤光栅在人体手指、手臂和膝盖关节弯曲传感的应用, 他们将光纤光栅嵌入硅胶管中, 并进一步将封装的光纤以正弦曲线弯曲地缝入纤维护套, 提升器件的应变响应范围和测量稳定性. Zaltieri等人^[59]使用硅胶封装的光纤光栅传感设备检测志愿者的腰椎屈伸状态, 他们使用运动捕捉系统(MoCap)获得人体腰椎位移从而可以与光纤光栅传感器件测量结果对比, 实验结果表明二者具有很好的一致性, 验证了光纤光栅在腰椎健康监测的应用前景. Li等人^[60]通过精心设计的缝制工艺流程, 不仅将光纤光栅传感器有效地集成到织物中, 而且提升了光纤光栅温度传感灵敏度; 他们通过测量分析植入织物多个部位的光纤光栅传感器响应, 实现了对人体温度的准确测量.

人通过手去触摸和感知外部世界, 手是人体最为灵巧的器官之一, 手指具有灵活性、复杂性等特征, 因此对手指运动状态的监测研究一直是研究者感兴趣的方向, 在人体工程学、术后康复、人机交互等领域都有重要的应用. da Silva等人^[61]将光纤光栅以弯曲形态串联地集成到手套中, 实现对手指大角度弯曲(90°)的实时快速(103°/s)传感检测; 使用串联式的光纤传感系统虽然更为紧凑, 但如果传感单元出现损坏时, 串联式设计系统维护较为复杂. Jha等人^[62]进一步优化设计了基于光纤光栅的传感手套, 角度分辨率达到0.1°, 他们将光纤光栅阵列以并联形式连接, 不同光纤光栅用于监测不同手指关节位置的弯曲角度, 并通过光纤合束器汇总到一路解调通道; 此外, 他们还演示了该手套在虚拟现实场景下的应用. Lin等人^[63]使用一系列串联式光纤光栅测量手指的弯曲姿势, 如图3(a)所示, 与之前报道的工作类似, 每一个关节位置安装一个光纤光栅器件, 通过测量每个光纤光栅的波长移动值,

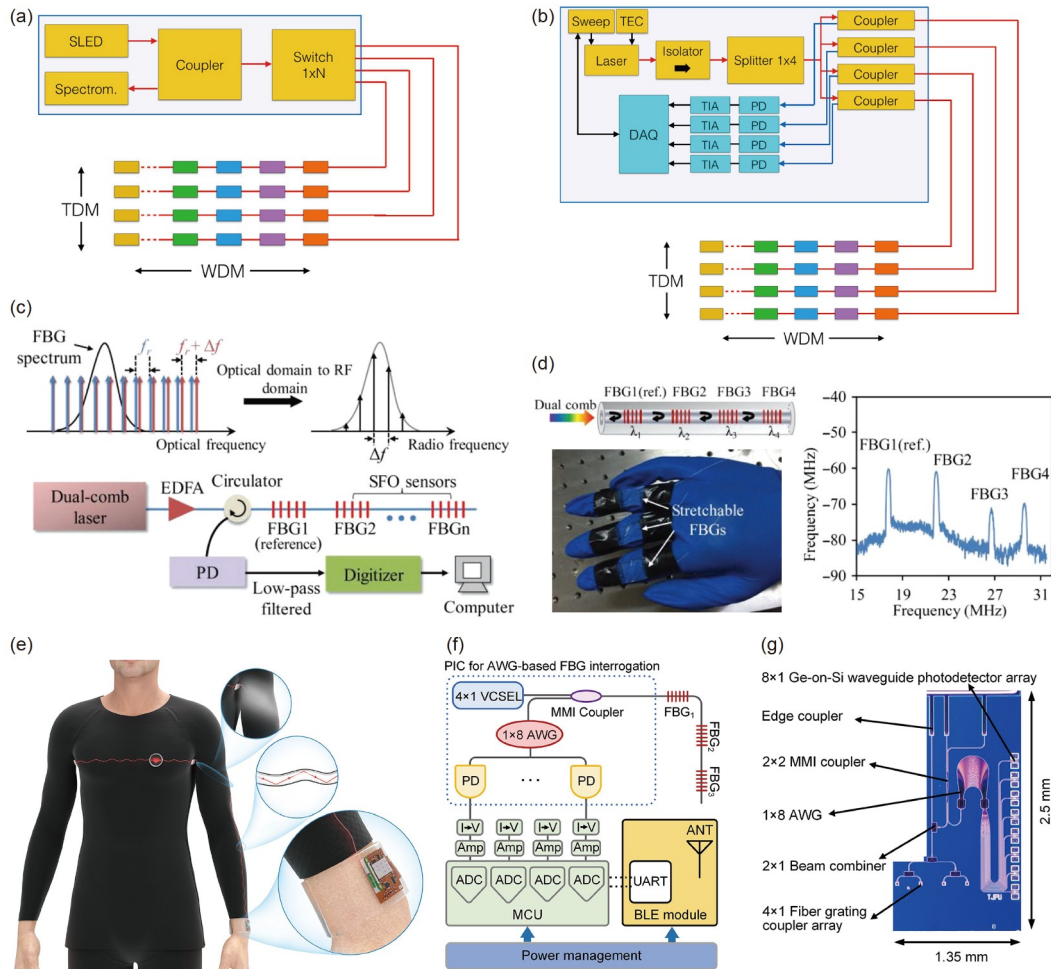


图 2 (网络版彩图)几种光纤光栅解调方式示意图. (a) 基于宽带光源的光栅传感解调系统, 红线为光路连接, 蓝色方框内包括了解调系统组成部件^[51]. (b) 基于激光扫描的光栅传感解调系统^[51]. (c) 基于双光梳光纤激光的光栅解调原理示意图^[43]. (d) 基于双光梳光纤激光解调光纤光栅传感阵列, 应用于手指姿态监测^[43]. (e) 集成的可穿戴光纤传感应用^[53]. (f) 光纤传感与解调集成系统组成部分示意图, 主要包括垂直腔面发射激光器、光纤光栅、阵列波导光栅和光电探测系统^[53]. (g) 基于阵列光栅结构的光栅解调系统样品图^[53]

Figure 2 (Color online) Typical several optical fiber Bragg grating interrogating methods. (a) Schematic of broadband light source based interrogation system for FBG sensors. The red lines are optical connections; the blue box includes all the building blocks of the interrogator [51]. (b) Illustration of scanning-laser based interrogation system for FBG sensors [51]. (c) Dual comb fiber laser based interrogation system for FBG sensors [43]. (d) The application of dual comb fiber laser for FBG sensor arrays for the hand gesture detection [43]. Copyright©2019, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. (e) The applications of integrated wearable fiber sensors [53]. (f) Schematic diagram of FBG sensors and interrogating system, which includes vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), fiber Bragg grating, arrayed waveguide grating (AWG), and photodetecting units [53]. (g) Microphotograph of the photonic integrated circuit for array waveguide grating based on FBG interrogation [53]. Copyright©2021, American Chemical Society.

得到每个指关节的角度. 在该工作中, 他们仔细校正了光纤光栅对手指弯曲的响应曲线, 并通过线性拟合的方法实现对手指弯曲的可视化建模显示.

对心血管系统和呼吸系统功能监测可以反映人体的许多病理或应激状态, 其重要性不言而喻^[55,56]. 人体呼吸监测的主要原理是通过呼吸气过程引起躯体位移, 从而对附着的光学传感器件施加应力/应变, 引起

输出光学信号的变化; 另外也可以通过监测呼吸过程引起气体流动、相对湿度变化或者温度变化来达到传感的目的^[55]. Issatayeva等人^[64]展示了一种由光纤光栅阵列和织物制成的弹性带(图3(b)), 用于测量人体呼吸特征. 每个弹性带由5个串联的弯曲排布的光纤光栅组成, 以实现多点探测, 避免单个传感器造成的误差, 而弯曲光纤结构可以提高器件应变响应范围. 实验中, 测

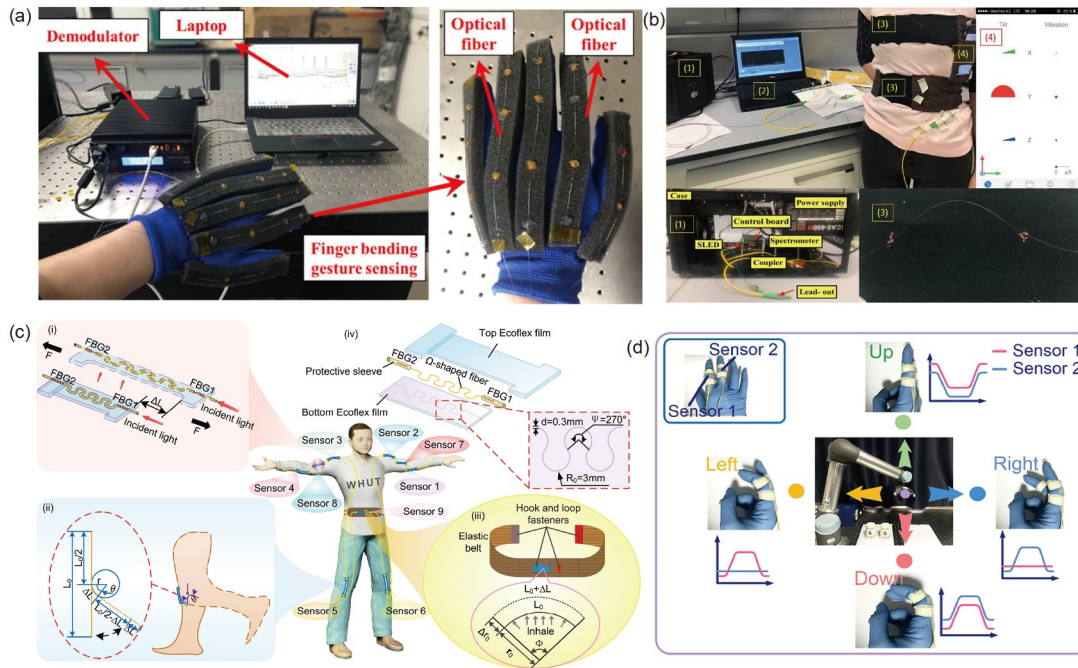


图3 (网络版彩图) 光纤光栅传感器在人体健康监测和人机交互的应用. (a) 光纤光栅集成的手套监测手指关节运动^[63]; (b) 光纤光栅集成的弹性带监测人体呼吸状态^[64]; (c) 可拉伸光纤光栅传感器应用到人体不同部位的力学传感^[66]; (d) 基于手指集成传感器的远程控制机器人^[67]

Figure 3 (Color online) FBG sensors' applications in human health monitoring and human-machine interface. (a) FBG integrated gloves for hand joint motion detection [63]; (b) FBG integrated elastic band for monitoring human respiration [64]; (c) stretchable FBG sensors for human biomechanics sensing [66]; (d) integrated sensors on hand fingers for remote control robots [67]. Copyright©2022, American Chemical Society.

试两名志愿者在不同状态下的呼吸状况, 测得传感器动态响应结果用滤波等算法处理后得到人体的呼吸特征曲线. 研究表明, 多点光纤传感测量系统可以有效克服测试环境噪声及测试者自身运动状态的影响. Presti 等人^[65]将光纤光栅制备的弹性带用于人体呼吸频率和心率的监测, 并应用到射箭运动员射击过程的呼吸和心率检测, 有效反映了运动员射击过程生理状态. Li 等人^[66]提出了双光纤光栅反射镜混合连接级联“Ω”形封装的光纤结构, 如图3(c)所示, 他们将光纤以弯曲形状嵌入硅胶薄膜中, 形成损耗区, 这种结构设计可以获得很高的拉伸形变; 光纤两端用两个光纤光栅连接, 两个光纤光栅分别反射不同的光波长, 但是由于其中一路反射光经过“Ω”形损耗区, 它的峰值光强将明显低于另一个反射光场光强. 因此, 可以通过探测两个光纤光栅反射光强的差异来探测施加在弯曲光纤区域上的拉伸或弯曲形变. 该设计结构巧妙地利用光纤光栅窄带滤波和弯曲光纤损耗特性来实现力学传感, 能有效抑制光源功率涨落、环境温度变化以及实现分布

式测量, 例如他们测得该传感器件可以稳定工作在 0°C – 55°C 环境中而不影响器件性能. 进一步地, 他们展示了该柔性器件在手臂肌肉伸缩触感、呼吸监测以及全身运动监测的应用案例. 最近, 该课题组优化光纤弯曲损耗结构, 设计了一种类似双叶草形状的光纤传感器^[67], 应用于人体肢体运动检测, 他们还结合了人机交互技术, 利用食指关节和中指关节上安装的两个柔性传感器, 实现了远程机械臂控制系统, 如图3(d)所示.

光纤光栅传感技术经过数十年的发展, 可以提供大规模、标准化、廉价的传感器件, 已经成为现代可穿戴柔性光学传感的主流技术. 然而, 由于多数光纤光栅是以标准单模光纤(裸光纤直径 $125\ \mu\text{m}$)为基础, 加上聚合物封装, 实际厚度将达到毫米量级, 使得绝大多数报道的光纤柔性传感器件具有尺寸较大、传感灵敏度相对较低等不足, 并且传感原理主要是基于应力/应变和温度两个物理参量; 而电学的可穿戴器件, 厚度可以达到数十微米量级^[68], 并且基于电化学原理能进

一步实现如对人体体液中生化指标的检测^[24]. 近年来, 微纳光纤器件的兴起, 为传统的氧化硅柔性器件研究提供了新的调控自由度与传感原理, 有望突破传统光纤光栅柔性器件的应用瓶颈, 以下将详细介绍微纳光纤在柔性传感研究的进展.

2.1.2 微纳光纤器件

微纳光纤是近年来快速发展的一种光纤结构, 与传统标准单模光纤相比, 微纳光纤直径在数十纳米到微米量级, 因此具有许多传统光纤不同的特性, 如强光场约束、强倏逝场、高非线性以及机械性能^[45,46,69-71]. 目前, 微纳光纤从材料组成成分上分类包括非晶(氧化硅、硫系玻璃等)、聚合物、介电晶体、半导体和金属, 而在柔性光纤传感应用领域目前主要以熔融氧化

硅材料为主^[37,38,70]. 图4(a)为应用广泛的微纳光纤结构示意图, 由尾纤区、过渡区和腰区三部分组成, 它是标准单模光纤通过拉锥方法制备. 微纳光纤的制备通常采用火焰加热手持式拉伸法、火焰加热机械扫描拉伸(图4(b))、电加热机械扫描拉伸及激光加热机械扫描拉伸等方法, 其中火焰加热机械扫描拉伸方法使用最多, 通过设定好氢气流速和拉伸速率等参数可以制备出均一性、低损耗的微纳光纤^[72,73]. Brambilla等人^[71,74]采用该方法制备亚微米直径氧化硅光纤, 传输损耗在1.55 μm 波长低至 10^{-3} dB/mm (图4(c)), 而之后Hoffman等人^[75]更是制备得到损耗低至 2.6×10^{-5} dB/mm的亚微米光纤. 对于微纳光纤机械强度性质, Brambilla等人^[71,76]测得半径小于200 nm的光纤强度大于10 GPa, 高于普通单模光纤极限强度(约为5 GPa). 利用光纤中的

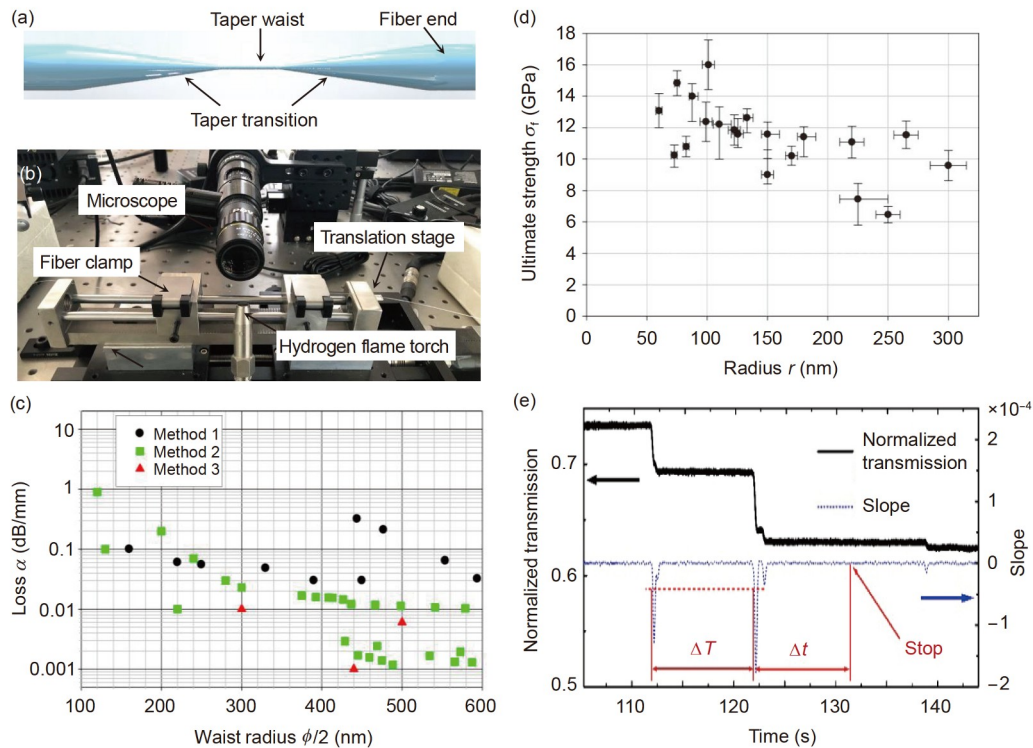


图4 (网络版彩图)微纳光纤制备与光机械性质. (a) 典型拉锥微纳光纤结构示意图. (b) 火焰加热机械扫描拉伸系统制备微纳光纤. (c) 3种微纳光纤制作方法的波导损耗与尺寸关系曲线^[71]. 方法1为“两步拉伸法”, 方法2为火焰加热机械扫描拉伸, 方法3为改进的火焰加热机械扫描拉伸. (d) 氧化硅微纳光纤的极限强度和半径的关系曲线^[71]. (e) 光纤在拉锥过程中光透过率的变化(黑色实线)及透过率时间的导数(蓝色虚线)^[79]

Figure 4 (Color online) Fabrications and optomechanic properties of optical micro/nanofibers. (a) Schematic of a tapered micro/nanofiber. (b) Flame-heating-pulling system for fabrications of micro/nanofibers. (c) The optical loss curve vs. fiber radius for three different fabrications methods [71]. Method 1 is the two stage process involving a sapphire rod heated by a flame; method 2 is the flame-brushing technique; method 3 is the modified flame-brushing technique. (d) The ultimate strength of silica nanofiber vs. fiber radius [71]. Copyright©2009, Optical Society of America. (e) Typical optical transmittance change (black solid curve) and its time derivations (blue dashed curve) during fiber tapering process [79]. Copyright©2017, Optical Society of America.

模式截止条件可以实现对光纤直径的精确控制^[77,78]. 微纳光纤尺寸的精确控制在非线性光学、传感、冷原子操控等领域具有重要意义, 近年来研究者陆续开发了许多不同的方法来实现在线测量和反馈控制微纳光纤尺寸^[70]. 例如, Xu等人^[79]利用固定波长下, 微纳光纤高阶模式截止尺寸与波导透过率变化的对应关系以及经典的光纤拉锥模型, 通过测量两个透过率突变点的时间间隔, 以及停止拉伸控制程序的时间点, 可以较为精确获得所需直径, 如图4(e)所示.

通常, 制备好的微纳光纤其包层为空气或低折射率材料, 例如聚二甲基硅氧烷(折射率 $n \approx 1.4$), 特氟龙($n \approx 1.31$), 光纤中的传播模式可以通过求解亥姆霍兹方程组得到, 对于 HE_{vm} 或者 EH_{vm} 模式, 其本征方程满足如下公式^[69]:

$$\left(\frac{J'_v(U)}{UJ_v(U)} + \frac{K'_v(W)}{WK_v(W)} \right) \left(\frac{n_1^2 J'_v(U)}{UJ_v(U)} + \frac{n_2^2 K'_v(W)}{WK_v(W)} \right) = \left(\frac{v\beta}{k} \right)^2 \left(\frac{V}{UW} \right)^4 \quad (3)$$

而对于TE或TM模式, 其本征方程满足如下公式^[69]:

$$\left(\frac{J_1(U)}{J_0(U)} + \frac{K_1(W)}{WK_0(W)} \right) \left(\frac{n_1^2 J_1(U)}{UJ_0(U)} + \frac{n_2^2 K_1(W)}{WK_0(W)} \right) = 0, \quad (4)$$

其中 U, W 分别为芯层和包层中的无量纲化的横向传播常数, n_1 和 n_2 分别为芯层和包层折射率, $J_v(U)$ 为 v 阶第一类柱贝塞尔函数, $K_v(W)$ 为 v 阶第二类修正贝塞尔函数, v 为整数, β 为纵向传播常数, k 表示真空中的波矢, V 为无量纲化结构参数. 通过数值计算求解对应的本征方程可以得到不同模式的传播常数, 进一步地计算得到模式的光场分布. 光学传感是微纳光纤最重要的应用之一. 对于亚波长直径的微纳光纤, 经典衍射极限使得波导包层具有大比例倏逝场, 极大地增强了光-物质相互作用, 使得微纳光纤器件对周围环境非常敏感, 因此光学传感已经成为微纳光纤最重要的应用之一, 在温度、应力/应变、折射率、电/磁场、生物分子等物理化学传感取得了许多进展^[45,46,69,70,80-82].

近年来, 针对人机交互和医疗健康领域对于高灵敏度、小型化可穿戴传感器的需求, 基于微纳光纤柔性传感器件逐渐得到研究者重视^[37,38,70]. 总体来说, 基于微纳光纤结构的可穿戴光纤技术较多地采用强度调制和波长调制传感原理, 而同时利用这两种传感机制,

可以实现多维光学传感应用^[83,84]. Li等人^[37,85]发展了柔性封装的杂化等离子激元微光纤结形腔器件(图5(a)), 他们利用微腔共振增强与等离子激元波导偏振依赖响应特性, 极大提升器件应变灵敏度, 实验测得应变规范因子达到13700, 压强检测灵敏度为 0.83 kPa^{-1} , 比传统光纤光栅器件灵敏度提升一个数量级以上; 进一步地, 他们将器件贴在人体手腕上监测生理信号, 成功测得脉搏、呼吸速率, 并且可以检测到微弱的脉搏信号. Zhu等人^[44]采用自组装的波浪形微光纤结构(图5(b)左下角子图), 一方面提升光纤器件可拉伸测量范围($\sim 10\%$), 同时阵列弯曲结构可以增强器件传感灵敏度(应变规范因子约为257), 尽管该结构比之前报道的杂化等离子激元微腔器件灵敏度低约两个数量级, 但是器件测量方法得到显著简化. 他们成功展示了该器件在3天时间跨度下对人体脉搏的监测, 同时结合心电图波形, 解析出血压变化曲线(如图5(b)), 该工作展示了可穿戴微光纤器件实用化前景. Li等人^[86]报道了胶囊状封装微光纤结构和光电一体化芯片, 实现无需对准的光纤传感, 准确检测人体呼吸和脉搏信息. Zhang等人^[38]报道了超高应变灵敏度的“光学皮肤”(应变灵敏度达到 1870 kPa^{-1} , 低至 7 mPa 压强检测极限, 响应速度 $10 \mu\text{s}$), 如图5(c)所示. 这主要归结于用微米级别的悬空微纳光纤波导和超薄柔性封装结构(数百微米到毫米量级), 从而获得微光纤弯曲引起的导模倏逝场高灵敏度变化特性. 他们展示了该器件在人体脉搏、呼吸、触觉等传感应用; 另外对于微纳光纤阵列, 当压力施加在不同的节点上时, 通过读取光强输出阵列得到相应的逻辑读数, 可以实现空间位置分辨的探测. 注意到该课题组与合作者近年来针对机器人控制、人机交互的应用场景, 围绕着微纳光纤结构设计与新型传感检测机理, 取得了系列研究工作进展, 例如温度/应变传感^[83,84]、仿触觉感知^[87-90]、声场探测^[91]、智能织物^[90]. 例如, Jiang等人^[88]报道了一种基于微光纤的仿触觉传感器, 该传感器具有指纹状表面, 模仿了人类手指皮肤的结构特征, 如图5(d)所示, 从而能够高耐用性地测量力大小和方向, 实现对物体形貌和材质的感知测量. Liu等人^[87]将湿度响应的染料分子薄膜集成到传感器设计中(图5(e)), 并结合双波导结构和双色探测法, 成功实现了无接触传感、触觉感知等应用. 此外, 近年来深度学习等智能算法研究的快速发展, 为传感器设计与信号处理提供了强大的工具^[8,9,90,92-94]. 一

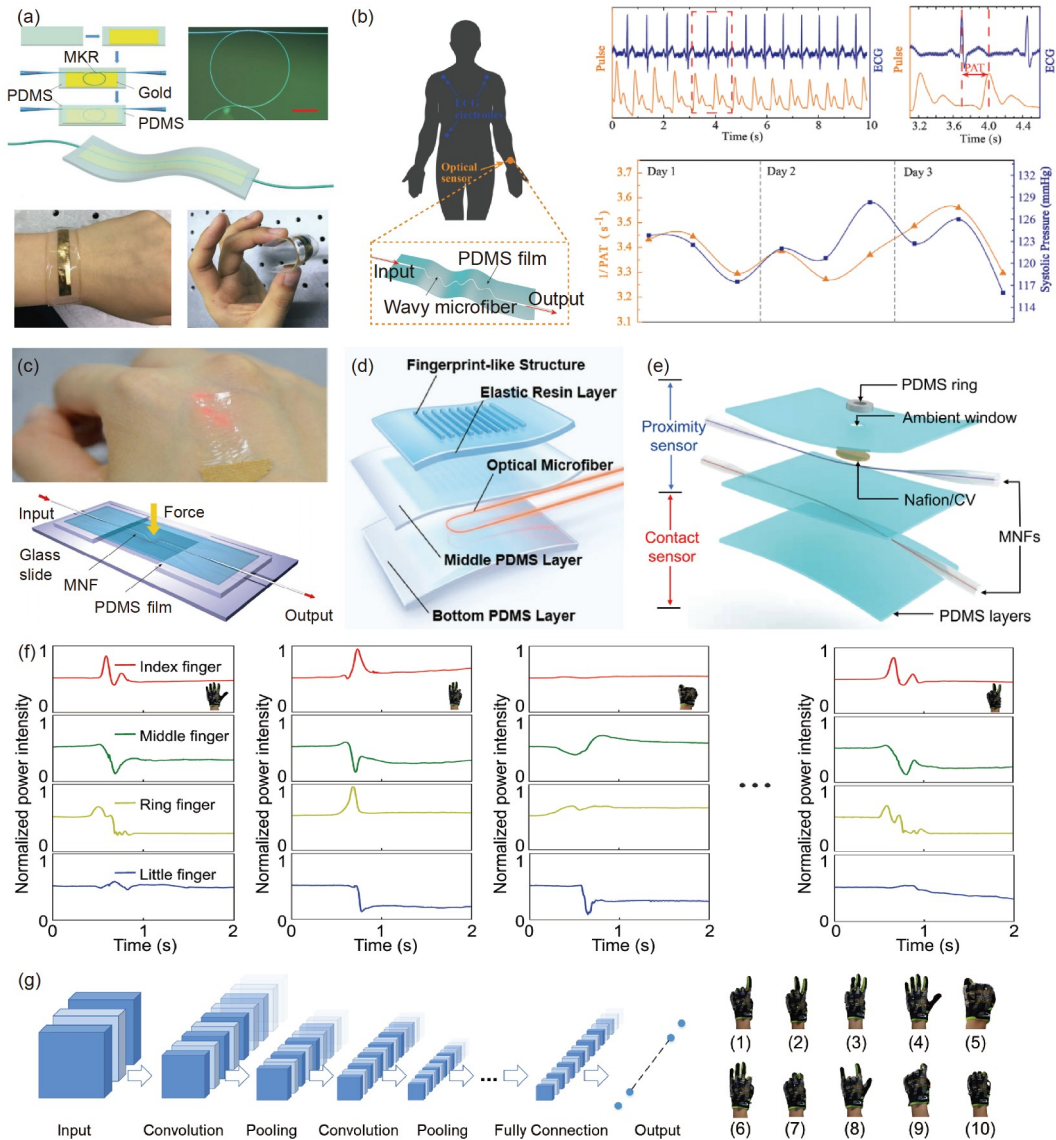


图 5 (网络版彩图)可穿戴微纳光纤传感器及应用. (a) 柔性封装的杂化等离子激元微光纤结形腔器件^[37]. (b) 自组装的波浪形微纳光纤器件监测人体脉搏与血压信号^[44]. (c) 微纳光纤“光学皮肤”器件和结构示意图^[38]. (d) 微纳光纤触觉传感器结构设计^[88]. (e) 微纳光纤湿度和应力双模传感器结构设计^[87]. (f) 阵列微纳光纤传感器检测人体手势姿态动态响应曲线^[8]. (g) 深度学习算法处理阵列传感器时序响应曲线, 实现对手势分类识别^[8]

Figure 5 (Color online) Wearable micro/nanofiber sensors and applications. (a) Soft encapsulated hybrid plasmonic microfiber knot resonator [37]. Copyright©2018, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. (b) Self-assembled wavy optical microfiber for monitoring human wrist pulse and blood pressure [44]. Copyright©2021, Wiley-VCH GmbH. (c) Skin-like microfiber device and its structure [38]. Copyright©2020, Institute of Optics and Electronics. (d) Schematic structures of micro/nanofiber tactile sensors [88]. Copyright©2021, Wiley-VCH GmbH. (e) Micro/nano fiber sensors for simultaneous detection of humidity and strain [87]. Copyright©2022, American Chemical Society. (f) Dynamic response of array micro/nanofiber sensors for various hand gestures [8]. (g) Deep learning data processing sequence for ten hand gestures perception [8]. Copyright©2022, Wiley-VCH GmbH.

方面, 机器学习可以用来更有效地处理传感数据, 即通过损失函数来自动地匹配最优数据以及建立内在的映射关系; 另一方面, 机器学习也可以用于优化传感器的设计或者布局^[94]. 例如, 针对手复杂动作的识别问题,

传统方法需要在各个手指关节安装传感器网络, 并且通过复杂的数学物理建模算法. Zhao等人^[8]提出利用手指运动关联响应的原理(图5(f)), 结合深度学习算法(图5(g)), 在降低传感器数量同时, 实现对手动作的精

确识别. 作为概念性验证, 他们通过四个传感器的时域响应数据, 演示了深度学习网络识别10种常用的手势, 在测试集中训练的精确度达到99.2%.

可穿戴微纳光纤传感器件及应用作为新兴的研究领域, 处在快速发展的阶段, 在人体健康监测和人机交互两个方面已经取得了不少重要进展. 由于微纳光纤波导固有的表面倏逝场分布特性, 使得器件结构设计有很大的灵活性并且能与外部集成的功能材料高效耦合^[45,95-97], 具有很大的研究潜力, 特别是在多维智能感知^[83,90]、体液生化检测^[98]等多学科交叉融合方向值得深入研究. 从实际应用角度, 微纳光纤器件还需要解决可控制备与封装技术问题, 获得器件传感性能与机械强度的平衡, 以及考虑长期工作力学疲劳等问题^[45]. 此外, 除了光纤光栅和微纳光纤两种常用的结构, 基于D型光纤、光纤端面和微结构光纤的传感器件在可穿戴健康监测领域应用也值得关注^[28,99-106]. 例如, Zhao等人^[101]制作了一种全光纤可穿戴呼吸传感器, 即采用飞秒激光在光纤端面上制备微悬臂, 其中微悬臂和光纤端面之间形成法布里布罗腔; 将其安装到口罩内, 用于测量人体呼吸气流速率. Li等人^[104]利用D型光纤的弯曲损耗特性(曲率传感灵敏度为 $-7.208\%/m^{-1}$), 实现对人体腕部脉搏和呼吸速率的实时监测.

2.2 聚合物光纤器件及应用

与2.1节介绍的氧化硅光纤不同, 聚合物光纤与人体组织的力学模量接近, 生物兼容性和可拉伸性更好, 并且易于加工和混合掺杂其他功能有机材料, 部分聚合物材料还具有可降解^[107]、自修复^[108]以及光学性质可调控特点^[109], 聚合物光纤已经成为可穿戴光学器件领域的重要组成部分, 并且在可植入和生化传感的应用场景下比氧化硅光纤更具优势^[35,36]. 考虑材料的光学透明性和折射率, 可拉伸聚合物光纤的基体材料主要包括水凝胶、可降解聚合物和橡胶类弹性体等^[35], 其中水凝胶和可降解聚合物适用于体内可植入的光传导和传感应用, 而橡胶类弹性体主要是体外的生物力学传感应用. 对于聚合物光纤, 其基本结构与标准单模光纤类似, 包括芯层高折射率介质和包层低折射率介质(空气、水、生物组织等), 通过全内反射原理实现光传输, 其尺寸一般大于单模光纤, 并且光传输损耗远大于氧化硅光纤, 典型的光传输损耗为dB/cm量级; 但是聚合物光纤更具有柔韧性, 可拉伸性能更好.

针对不同聚合物材料和波导结构, 研究人员开发了许多工艺技术, 包括模具铸造法(Molding)、浸涂法(Dip-coating)、3D打印、热拉制(Thermal-drawing)、共挤出成型(Coextrusion)、光刻等^[35], 其中较常用的是采用模具铸造法, 即将聚合物前驱体注入设计模具中固化成型^[10,110,111], 但这种方法适用于小规模实验室制备, 并不适合大规模生产. Leber等人^[112]采用一体式连续共挤出工艺, 可以在一小时内制造出数百米长的光纤, 如图6(a)所示, 该方法具有规模生产的潜力. 此外, 聚合物光纤传感系统需要考虑光耦合问题, 光器件与聚合物光纤耦合结构中, 常见有直接耦合、透镜耦合、光纤透镜耦合等方式, 其中直接耦合结构效率较低(约为10%), 而光纤透镜耦合结构的效率可以达到85%^[113].

在光学传感机制方面, 波导弯曲损耗和散射/吸收损耗特性的应用是最为广泛的^[35,36,114]; 注意到均一结构的聚合物光纤器件的传感灵敏度一般较低, 因此需要通过材料和结构的设计来增强传感性能. Zheng等人^[115]在聚合物光纤侧面加工V形槽结构来提升应变传感灵敏度; 此外, 在聚合物光纤添加吸收介质^[10,110,111,116]也是一种提升传感灵敏度的重要方法, 这可以用比尔-朗博定律(Beer-Lambert Law)来理解^[10]: $A = \alpha L \rho$, 这里 A 为光吸收率, α 为材料的吸收系数, L 是有效长度, ρ 是吸收介质的浓度; 可以发现在初始长度和相同拉伸应变条件下, 吸收介质浓度越大, 检测灵敏度越高. Guo等人^[111]报道了罗丹明B染料掺杂的聚二甲硅氧烷(PDMS)波导(图6(b)), 实现较大的动态应变响应范围(100%)以及较高的应变分辨精度~1%. 最近, Liang等人^[117]将力致发光材料(ZnS: Cu)掺入聚合物光纤中, 当传感区域受力时, 力致发光材料将机械能转化为光能, 实现无需供电的(力致)自发光波导(图6(c)), 这种自驱动的传感器设计在植入式监测系统具有应用潜力.

人体力学传感和人机互动是聚合物光纤的重要应用. 注意到聚合物光纤尺寸较大, 可拉伸性能好, 因此较多地应用于监测大变形的场景. Harnett等人^[118]研究了表面涂覆低折射率硅胶的聚氨酯纤维光纤应变传感特性, 并将其缝入弹性带中(图6(d)), 实现对膝盖受力的传感. Pan等人^[119]开发了芯层填充液体的柔性聚合物光纤, 该结构兼顾了器件可拉伸性以及力学传感灵敏度, 如图6(e)所示, 当传感部位受到外力作用产生变

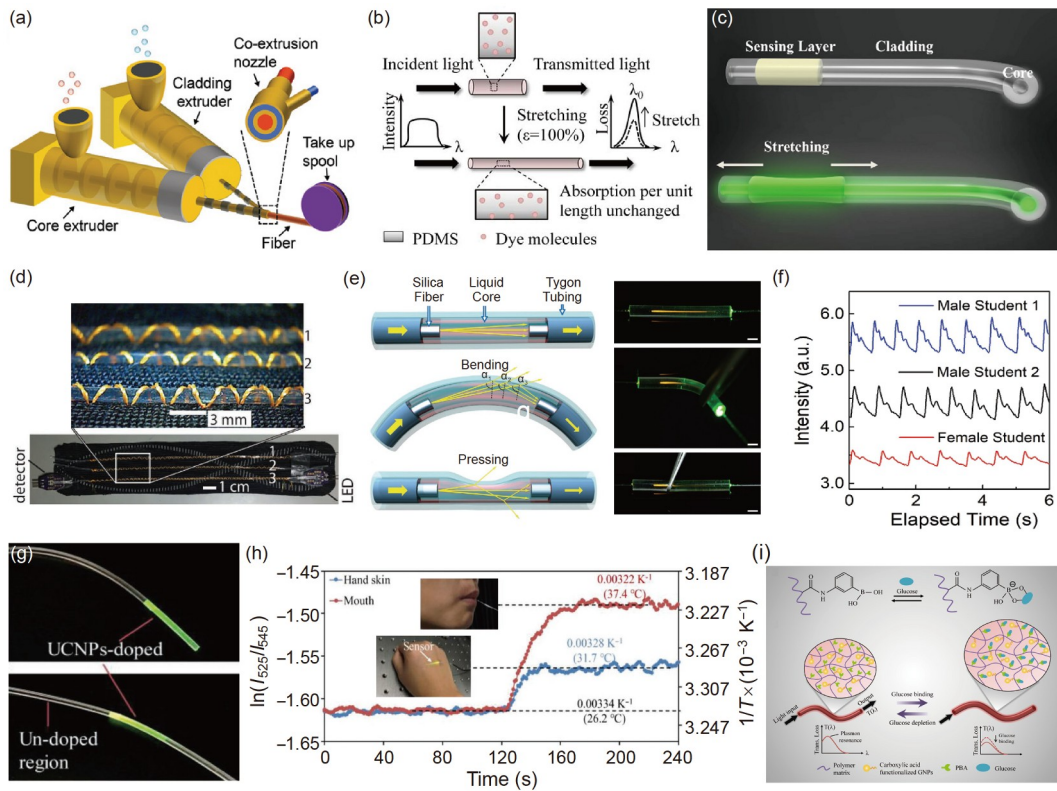


图 6 (网络版彩图)可穿戴聚合物光纤传感器件及应用. (a) 一体式连续共挤出工艺制备聚合物光纤示意图^[112]. (b) 染料分子掺杂的PDMS光纤力学传感机理示意图^[111]. (c) 力致发光光纤在静态和拉伸状态示意图^[117]. (d) 聚氨酯纤维光纤集成可穿戴织物实物图^[118]. (e) 柔性液体芯光纤在平直、弯曲和按压状态下光传播状态示意图与实物照片^[119]. (f) 柔性液体芯光纤实时测量脉搏信号^[119]. (g), (h) 上转换纳米颗粒掺杂聚合物光纤及其在体温测量的应用^[42]. (i) 功能修饰的水凝胶光纤检测葡萄糖浓度的传感机理示意图^[122]

Figure 6 (Color online) Wearable polymer fiber sensors and applications. (a) Schematic of the one-step coextrusion fabrication of stretchable step-index optical fibers [112]. Copyright©2018, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. (b) Dye doped PDMS fiber for strain sensing [111]. Copyright©2017, Optical Society of America. (c) Schematic illustration of the self-powered stretchable optical fiber in static and stretched state [117]. (d) Stretchable fibers installed in athletic tape [118]. Copyright©2017, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. (e) Schematics of the propagation of light in a straight, bent, and pressed fiber composing liquid core and polymer cladding [119]. (f) Soft liquid-filled fiber for monitoring wrist pulse signal [119]. Copyright©2020, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. (g), (h) Incorporation of the upconversion nanoparticles in polymer fibers and their applications for human body temperature detection [42]. Copyright©2019, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. (i) Schematic of modified hydrogel fiber for glucose detection [122].

形时, 传输光的全反射条件被破坏, 使得透射损耗增加. 实验测试表明, 器件弯曲分辨率可达 0.18° , 压力检测极限为 0.7 mN . 由于该传感器件具有较高的灵敏度, 他们也展示了其对人体脉搏(图6(f))、呼吸的监测应用. Guo等人^[116]系统研究了染料分子掺杂水凝胶光纤的应力传感特性, 并展示了不同染料分子分段掺杂光纤的分布式传感应用. Bai等人^[41]针对可穿戴器件多维力学传感难题, 结合波导弯曲损耗和吸收损耗传感机制, 巧妙设计染料掺杂聚合物双波导结构, 首次实现了空间分辨的力学模式(拉伸、弯曲、挤压)的解耦测量, 并应用于传感手套, 实现同时检测手指关节的运

动和受力情况. Zhao等人^[10]发展了光电传感、探测一体化设计, 将阵列聚合物波导的力学传感应用于机械手, 展示了复杂的机械操控与触觉传感. 最近, Zhou等人^[120]利用聚合物波导各向异性的力学响应特性, 实现了多轴触觉传感器, 并展示了其在人体和机械臂握握任务的测量应用. 体温是人体健康的重要指标之一, 对于均一结构的聚合物光纤要实现高灵敏的温度传感测量是困难的. Guo等人^[42]将温度响应的上转换荧光颗粒掺入PDMS光纤中(图6(g)), 上转换荧光颗粒在单色近红外光激发下, 发射宽带光谱, 并且光谱强度分布和环境温度相关; 他们通过监测双波长强度的方法,

可以准确解析出环境温度变化, 在 25°C – 70°C 测量范围检测极限为 0.3°C , 值得注意的是该方法还能有效地解耦应变对温度传感的影响, 他们实验测得该器件能稳定工作在80%的应变条件下. 基于该柔性温度传感器, 他们实验展示了对不同体表部位温度的测量过程, 如图6(h)所示.

在人体内生化传感应用中, 水凝胶材料具有显著的优势. 水凝胶不仅具有良好的力学性能, 而且其内部三维聚合网络结构包含大量的亲水官能团, 与生物组织相容性非常好, 一般可以在人体内停留很长时间, 而不会使人体产生免疫学的严重排斥或损害, 因此是作为植入式传感的理想材料^[36]. 此外, 水凝胶内部孔隙结构还能用于容纳功能性生物分子, 例如酶、细胞等, 从而容易通过材料设计实现不同的生化传感^[36], 包括pH值^[121]、分子/离子浓度^[122,123]等. Choi等人^[124]用海藻酸盐制作水凝胶光波导, 在492 nm的波长下, 测得水凝胶光纤在生物组织环境中光传输损耗为0.32 dB/cm, 在空气中光传输损耗为0.42 dB/cm; 他们将水凝胶光纤植入活体小鼠体内, 用于收集组织的血氧饱和度等信息. Guo等人^[122]将水凝胶光纤修饰上金纳米颗粒以及对葡萄糖分子强亲和性的小分子(3-APBA), 实现人体内葡萄糖检测, 如图6(i)所示; 葡萄糖分子结合到光纤上时, 引起水凝胶基质的膨胀, 进一步改变金颗粒等离子共振吸收光谱, 通过检测光强衰减得到葡萄糖浓度; 他们还采用双波长差分强度检测方法降低光纤弯曲损耗对葡萄糖浓度检测的影响. 水凝胶光纤中的水很容易蒸发或冻结导致其性能下降, 在体外的干燥环境中需要特殊封装来使其水分不蒸发, 使用有机溶剂代替其中的部分水分子是其中一个有效的方法. 例如, Yang等人^[125]用丙二醇浸泡过的水凝胶制作而成的可拉伸应变传感器, 提高了它的抗冻和抗干燥能力. Yu等人^[126]制备了多交联聚二甲基水凝胶光纤, 掺入甘油以提高它的保湿性: 经过552 h后, 水分只减少10.39%; 通过进一步添加氯化钠和海藻酸钠以降低其结冰点, 在 -17°C 下仍具有抗冻性.

虽然聚合物光纤较于氧化硅光纤有更好的材料、结构调控灵活性, 并且在可植入、大动态应变场景下的传感应用更具潜力, 但是其进一步发展也有一些基本的限制^[36], 包括高的光传输损耗、光机械稳定性、可控制备等, 相信通过材料、结构以及光谱检测技术的综合优化设计, 这些问题最终能得到解决.

3 总结和展望

迄今为止, 国内外研究人员已经对可穿戴光纤传感器件开展了大量研究, 在人体健康监测、动作捕捉、语音识别、人机交互等方面取得了一系列重要进展, 与快速发展的可穿戴电学传感器件形成良好的互补. 特别地, 氧化硅光纤和聚合物光纤传感体系各有优劣, 适用情况也有所不同: 光纤光栅是目前商业化应用最广泛的传感器件, 但是其内禀的刚性结构, 不利于应用在大形变和人体内部传感领域, 并且由于解调系统较为复杂, 成本较高; 微纳光纤传感器件尺寸小、灵敏度高, 有利于高密度集成, 但是器件的机械强度较低、长期工作稳定性有待解决; 聚合物光纤与人体组织的力学模量接近, 生物兼容性和可拉伸性更好, 易于加工和掺杂其他功能有机材料, 在人体内部和外部传感应用都已经有一定进展, 不足之处是光传输损耗和连接损耗较大. 值得注意的是, 相对于日趋成熟的柔性电子器件, 可穿戴光纤器件还存在一些限制发展的因素: 首先, 传统光纤器件光源和探测系统的集成化还非常不成熟, 目前绝大多数光纤传感系统是有线连接的, 非常影响用户使用体验和长期便携穿戴, 系统集成化(“无线”传感系统)会是近期重要的发展方向^[10,53]; 其次, 光纤传感器长期工作光机械稳定性问题需要关注. 由于单模氧化硅光纤和聚合物光纤器件尺寸较大, 与人体表面贴合性较差, 长期使用传感器安装位置偏移以及人体机械运动引起信号耦合, 将显著影响传感信号的信噪比; 而对于微纳光纤器件, 尽管可以获得很高的传感灵敏度和超薄封装结构, 然而总体机械强度较低, 易损坏. 针对传感信号采集问题, 研究者也开发了一些技术方法, 包括传感器封装设计^[86]、多传感器联合测量^[64]、自参考光谱^[42]等; 而对于光纤器件长期工作的力学疲劳问题还少有人关注. 对于可穿戴光纤器件未来发展, 也有一些方向值得关注: (1) 高精度3D打印技术的兴起, 使得柔性器件的几何结构设计自由度得到提升^[127], 可以实现功能更复杂的分布式光学传感网络^[128]; (2) 光电混合传感系统结合光学传感和电学传感的优势, 可以实现多层次、多模态的传感检测^[129]; (3) 深度学习等智能算法快速发展, 为传感器系统设计和信号处理提供新的选择, 例如对于人体手势识别上, 人体动作信号的模糊性、传感器信号耦合与串扰等因素不仅可以得到有效解决,

还有望降低传感器的数量^[8,92]; (4) 光纤传感器优势在于对复杂电磁环境免疫, 因此如何应用该独特性质去研究具体问题值得关注, 例如强磁场环境下对生物体生理信号影响问题.

参考文献

- 1 Heikenfeld J, Jajack A, Rogers J, et al. Wearable sensors: Modalities, challenges, and prospects. *Lab Chip*, 2018, 18: 217–248
- 2 Wang X, Liu Z, Zhang T. Flexible sensing electronics for wearable/attachable health monitoring. *Small*, 2017, 13: 1602790
- 3 Swift R M, Martin C S, Swette L, et al. Studies on a wearable, electronic, transdermal alcohol sensor. *Alcoholism Clin Exp Res*, 1992, 16: 721–725
- 4 Rachim V P, Chung W Y. Wearable-band type visible-near infrared optical biosensor for non-invasive blood glucose monitoring. *Sens Actuat B-Chem*, 2019, 286: 173–180
- 5 Gatzoulis L, Iakovidis I. Wearable and portable eHealth systems: Technological issues opportunities for personalized care. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 2007, 26: 51–56
- 6 Sakakida M, Nishida K, Shichiri M, et al. Ferrocene-mediated needle-type glucose sensor covered with newly designed biocompatible membrane. *Sens Actuat B-Chem*, 1993, 13: 319–322
- 7 Pantelopoulou A, Bourbakis N G. A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis. *IEEE Trans Syst Man Cybern C*, 2010, 40: 1–12
- 8 Zhao L, Wu B, Niu Y, et al. Soft optoelectronic sensors with deep learning for gesture recognition. *Adv Mater Technol*, 2022, 7: 2101698
- 9 Van Meerbeek I M, De Sa C M, Shepherd R F. Soft optoelectronic sensory foams with proprioception. *Sci Robot*, 2018, 3: 2489
- 10 Zhao H, O'Brien K, Li S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides. *Sci Robot*, 2016, 1: eaai7529
- 11 Wan C, Wu Z, Huang X. Research progress in flexible wearable sensing and intelligent recognition techniques (in Chinese). *Sci Sin Chim*, 2022, 52: 1913–1924 [晚春雪, 吴子悦, 黄显. 柔性可穿戴传感与智能识别技术研究进展. 中国科学: 化学, 2022, 52: 1913–1924]
- 12 Shi Q, Dong B, He T, et al. Progress in wearable electronics/photronics—Moving toward the era of artificial intelligence and internet of things. *InfoMat*, 2020, 2: 1131–1162
- 13 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. *Adv Mater*, 2013, 25: 5997–6038
- 14 Trung T Q, Lee N. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare. *Adv Mater*, 2016, 28: 4338–4372
- 15 Yang J C, Mun J, Kwon S Y, et al. Electronic skin: Recent progress and future prospects for skin-attachable devices for health monitoring, robotics, and prosthetics. *Adv Mater*, 2019, 31: 1904765
- 16 Zheng Y J, Yin R, Zhao Y, et al. Conductive MXene/cotton fabric based pressure sensor with both high sensitivity and wide sensing range for human motion detection and E-skin. *Chem Eng J*, 2021, 420: 127720
- 17 Chen Y, Xu Y W, Gao Q, et al. Fabrication of wearable hydrogel sensors with simple Ionic-digital conversion and inherent water retention. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 6802–6810
- 18 Liao X Q, Song W T, Zhang X Y, et al. A bioinspired analogous nerve towards artificial intelligence. *Nat Commun*, 2020, 11: 268
- 19 Wu R, Seo S, Ma L Y, et al. Full-fiber auxetic-interlaced yarn sensor for sign-language translation glove assisted by artificial neural network. *Nano-Micro Lett*, 2022, 14: 139
- 20 Rana M, Mittal V. Wearable sensors for real-time kinematics analysis in sports: A review. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 1187–1207
- 21 Li T L, Qiao F, Huang P A, et al. Flexible optical fiber-based smart textile sensor for human-machine interaction. *IEEE Sens J*, 2022, 22: 19336–19345
- 22 Kamišalić A, Fister I, Turkanović M, et al. Sensors and functionalities of non-invasive wrist-wearable devices: A review. *Sensors*, 2018, 18: 1714
- 23 Meng K Y, Xiao X, Wei W X, et al. Wearable pressure sensors for pulse wave monitoring. *Adv Mater*, 2022, 34: 2109357
- 24 Gao W, Emaminejad S, Nyein H Y Y, et al. Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis. *Nature*, 2016,

- 529: 509–514
- 25 Nag A, Nuthalapati S, Mukhopadhyay S C. Carbon fiber/polymer-based composites for wearable sensors: A review. *IEEE Sens J*, 2022, 22: 10235–10245
- 26 Zhao Y, Li X G, Zhou X, et al. Review on the graphene based optical fiber chemical and biological sensors. *Sens Actuat B-Chem*, 2016, 231: 324–340
- 27 Yamada T, Hayamizu Y, Yamamoto Y, et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection. *Nat Nanotech*, 2011, 6: 296–301
- 28 Shivananju B N, Yu W Z, Liu Y, et al. The roadmap of graphene-based optical biochemical sensors. *Adv Funct Mater*, 2017, 27: 1603918
- 29 Liu J W, Wang J L, Wang Z H, et al. Manipulating nanowire assembly for flexible transparent electrodes. *Angew Chem Int Ed*, 2014, 53: 13477–13482
- 30 Tocco J D, Presti D L, Zaltieri M, et al. A wearable system based on flexible sensors for unobtrusive respiratory monitoring in occupational settings. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 14369–14378
- 31 Xu C, Song Y, Han M D, et al. Portable and wearable self-powered systems based on emerging energy harvesting technology. *Microsyst Nanoeng*, 2021, 7: 25
- 32 Zou Y, Raveendran V, Chen J. Wearable triboelectric nanogenerators for biomechanical energy harvesting. *Nano Energy*, 2020, 77: 105303
- 33 Anwar S, Amiri M H, Jiang S, et al. Piezoelectric nylon-11 fibers for electronic textiles, energy harvesting and sensing. *Adv Funct Mater*, 2021, 31: 2004326
- 34 Zhao X, Han W J, Zhao C S, et al. Fabrication of transparent paper-based flexible thermoelectric generator for wearable energy harvester using modified distributor printing technology. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 10301–10309
- 35 Guo J, Yang C, Dai Q, et al. Soft and stretchable polymeric optical waveguide-based sensors for wearable and biomedical applications. *Sensors*, 2019, 19: 3771
- 36 Wu C, Liu X, Ying Y. Soft and stretchable optical waveguide: Light delivery and manipulation at complex biointerfaces creating unique windows for on-body sensing. *ACS Sens*, 2021, 6: 1446–1460
- 37 Li J H, Chen J H, Xu F. Sensitive and wearable optical microfiber sensor for human health monitoring. *Adv Mater Technol*, 2018, 3: 1800296
- 38 Zhang L, Pan J, Zhang Z, et al. Ultrasensitive skin-like wearable optical sensors based on glass micro/nanofibers. *Opto-Electron Adv*, 2020, 3: 19002201–19002207
- 39 Sun J, Meng J W, Tang S J, et al. An encapsulated optical microsphere sensor for ultrasound detection and photoacoustic imaging. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2022, 65: 224211
- 40 Liu J, Bo F, Chang L, et al. Emerging material platforms for integrated microcavity photonics. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2022, 65: 104201
- 41 Bai H, Li S, Barreiros J, et al. Stretchable distributed fiber-optic sensors. *Science*, 2020, 370: 848–852
- 42 Guo J, Zhou B, Yang C, et al. Stretchable and temperature-sensitive polymer optical fibers for wearable health monitoring. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1902898
- 43 Guo J J, Zhao K J, Zhou B Q, et al. Wearable and skin-mountable fiber-optic strain sensors interrogated by a free-running, dual-comb fiber laser. *Adv Opt Mater*, 2019, 7: 1900086
- 44 Zhu H T, Zhan L W, Dai Q, et al. Self-assembled wavy optical microfiber for stretchable wearable sensor. *Adv Opt Mater*, 2021, 9: 2002206
- 45 Chen J H, Li D R, Xu F. Optical microfiber sensors: Sensing mechanisms, and recent advances. *J Lightwave Technol*, 2019, 37: 2577–2589
- 46 Zhang L, Tang Y, Tong L M. Micro-/nanofiber optics: Merging photonics and material science on nanoscale for advanced sensing technology. *iScience*, 2020, 23: 100810
- 47 Fini J M. Microstructure fibres for optical sensing in gases and liquids. *Meas Sci Technol*, 2004, 15: 1120–1128
- 48 Rao Y J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors. *Opt Lasers Eng*, 1999, 31: 297–324
- 49 Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *J Lightwave Technol*, 1997, 15: 1263–1276
- 50 Kinet D, Mégret P, Goossen K, et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions. *Sensors*, 2014, 14: 7394–7419
- 51 Tosi D. Review and analysis of peak tracking techniques for fiber Bragg grating sensors. *Sensors*, 2017, 17: 2368
- 52 Thomson D, Zilkie A, Bowers J E, et al. Roadmap on silicon photon. *J Opt*, 2016, 18: 073003
- 53 Li H Q, An Z X, Zhang S, et al. Fully photonic integrated wearable optical interrogator. *ACS Photon*, 2021, 8: 3607–3618

- 54 Al-Fakih E, Osman N A A, Adikan F R M. The use of fiber Bragg grating sensors in biomechanics and rehabilitation applications: The state-of-the-art and ongoing research topics. *Sensors*, 2012, 12: 12890–12926
- 55 Massaroni C, Zaltieri M, Lo Presti D, et al. Fiber Bragg grating sensors for cardiorespiratory monitoring: A review. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 14069–14080
- 56 Mishra V, Singh N, Tiwari U, et al. Fiber grating sensors in medicine: Current and emerging applications. *Sens Actuat A-Phys*, 2011, 167: 279–290
- 57 Abro Z A, Hong C, Chen N, et al. A fiber Bragg grating-based smart wearable belt for monitoring knee joint postures. *Textile Res J*, 2020, 90: 386–394
- 58 Li L Q, He R J, Soares M S, et al. Embedded FBG-based sensor for joint movement monitoring. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 26793–26798
- 59 Zaltieri M, Massaroni C, Lo Presti D, et al. A wearable device based on a fiber Bragg grating sensor for low back movements monitoring. *Sensors*, 2020, 20: 3825
- 60 Li H Q, Yang H H, Li E B, et al. Wearable sensors in intelligent clothing for measuring human body temperature based on optical fiber Bragg grating. *Opt Express*, 2012, 20: 11740–11752
- 61 da Silva A F, Goncalves A F, Mendes P M, et al. FBG sensing glove for monitoring hand posture. *IEEE Sens J*, 2011, 11: 2442–2448
- 62 Jha C K, Gajapure K, Chakraborty A L. Design and evaluation of an FBG sensor-based glove to simultaneously monitor flexure of ten finger joints. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 7620–7630
- 63 Lin Q J, Yao K, Zhao N, et al. Finger bending sensing based on series-connected fiber Bragg gratings. *Materials*, 2022, 15: 3472
- 64 Issatayeva A, Beisenova A, Tosi D, et al. Fiber-optic based smart textiles for real-time monitoring of breathing rate. *Sensors*, 2020, 20: 3408
- 65 Presti D L, Romano C, Massaroni C, et al. Cardio-respiratory monitoring in archery using a smart textile based on flexible fiber Bragg grating sensors. *Sensors*, 2019, 19: 3581
- 66 Li T L, Su Y F, Chen F Y, et al. A skin-like and highly stretchable optical fiber sensor with the hybrid coding of wavelength-light intensity. *Adv Intell Syst*, 2022, 4: 2100193
- 67 Li T L, Su Y F, Chen F Y, et al. Bioinspired stretchable fiber-based sensor toward intelligent human-machine interactions. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 22666–22677
- 68 Lee S, Franklin S, Hassani F A, et al. Nanomesh pressure sensor for monitoring finger manipulation without sensory interference. *Science*, 2020, 370: 966–970
- 69 Tong L M. Micro-nano fiber and its application: Research progress and future opportunities (in Chinese). *Opt Optoelectron Technol*, 2020, 4: 12–17 [童利民. 微纳光纤及其应用: 研究进展及未来机遇. *光学与光电技术*, 2020, 4: 12–17]
- 70 Tong L M. Recent progress in optical micro/nanofiber technology (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2022, 42: 1706001 [童利民. 微纳光纤技术: 近期研究进展. *光学学报*, 2022, 42: 1706001]
- 71 Brambilla G, Xu F, Horak P, et al. Optical fiber nanowires and microwires: Fabrication and applications. *Adv Opt Photon*, 2009, 1: 107–161
- 72 Kang Y, Liu K Y, Xie Y, et al. Fabrication methods and high-precision diameter control techniques of optical micro-/nanofibers (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 084212 [康仪, 刘可盈, 谢宇, 等. 微纳光纤制备方法及高精度直径控制技术. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50: 084212]
- 73 Yao N, Linghu S, Xu Y X, et al. Ultra-long subwavelength micro/nanofibers with low loss. *IEEE Photon Technol Lett*, 2020, 32: 1069–1072
- 74 Brambilla G, Xu F, Feng X. Fabrication of optical fibre nanowires and their optical and mechanical characterisation. *Electron Lett*, 2006, 42: 517–519
- 75 Hoffman J E, Ravets S, Grover J A, et al. Ultrahigh transmission optical nanofibers. *AIP Adv*, 2014, 4: 4879799
- 76 Brambilla G, Payne D N. The ultimate strength of glass silica nanowires. *Nano Lett*, 2009, 9: 831–835
- 77 Yu Y, Zhang X, Song Z, et al. Precise control of the optical microfiber tapering process based on monitoring of intermodal interference. *Appl Opt*, 2014, 53: 8222–8228
- 78 Kang Y, Gong J, Xu Y, et al. Ultrahigh-precision diameter control of nanofiber using direct mode cutoff feedback. *IEEE Photon Technol Lett*, 2020, 32: 219–222
- 79 Xu Y X, Fang W, Tong L M. Real-time control of micro/nanofiber waist diameter with ultrahigh accuracy and precision. *Opt Express*, 2017, 25: 10434–10440
- 80 Tong L M. Micro/nanofibre optical sensors: Challenges and prospects. *Sensors*, 2018, 18: 903

- 81 Luo W, Chen Y, Xu F. Recent progress in microfiber-optic sensors. *Photon Sens*, 2021, 11: 45–68
- 82 Zhang Z, Kang Y R, Yao N, et al. A multifunctional airflow sensor enabled by optical micro/nanofiber. *Adv Fiber Mater*, 2021, 3: 359–367
- 83 Pan J, Zhang Z, Jiang C P, et al. A multifunctional skin-like wearable optical sensor based on an optical micro-/nanofibre. *Nanoscale*, 2020, 12: 17538–17544
- 84 Yao N, Wang X, Ma S, et al. Single optical microfiber enabled tactile sensor for simultaneous temperature and pressure measurement. *Photon Res*, 2022, 10: 2040–2046
- 85 Li J H, Chen J H, Yan S C, et al. Versatile hybrid plasmonic microfiber knot resonator. *Opt Lett*, 2017, 42: 3395–3398
- 86 Li L Y, Liu Y F, Song C Y, et al. Wearable alignment-free microfiber-based sensor chip for precise vital signs monitoring and cardiovascular assessment. *Adv Fiber Mater*, 2022, 4: 475–486
- 87 Liu H, Song X, Wang X, et al. Optical microfibers for sensing proximity and contact in human-machine interfaces. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 14447–14454
- 88 Jiang C, Zhang Z, Pan J, et al. Finger-skin-inspired flexible optical sensor for force sensing and slip detection in robotic grasping. *Adv Mater Technol*, 2021, 6: 2100285
- 89 Tang Y, Liu H, Pan J, et al. Optical micro/nanofiber-enabled compact tactile sensor for hardness discrimination. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 4560–4566
- 90 Ma S, Wang X, Li P, et al. Optical micro/nano fibers enabled smart textiles for human-machine interface. *Adv Fiber Mater*, 2022, 4: 1108–1117
- 91 Yu C W, Yao C N, Pan C J, et al. Highly sensitive and fast response strain sensor based on evanescently coupled micro/nanofibers. *Opto-Electron Adv*, 2022, 5: 210101
- 92 Wang S, Wang X, Wang S, et al. Optical-nanofiber-enabled gesture-recognition wristband for human-machine interaction with the assistance of machine learning. *Adv Intell Syst*, 2023, 5: 2200412
- 93 Massari L, Fransvea G, D’Abbraccio J, et al. Functional mimicry of Ruffini receptors with fibre Bragg gratings and deep neural networks enables a bio-inspired large-area tactile-sensitive skin. *Nat Mach Intell*, 2022, 4: 425–435
- 94 Ballard Z, Brown C, Madni A M, et al. Machine learning and computation-enabled intelligent sensor design. *Nat Mach Intell*, 2021, 3: 556–565
- 95 Chen J H, Xiong Y F, Xu F, et al. Silica optical fiber integrated with two-dimensional materials: Towards opto-electro-mechanical technology. *Light Sci Appl*, 2021, 10: 78
- 96 Li Y, Tan S, Yang L, et al. Optical microfiber neuron for finger motion perception. *Adv Fiber Mater*, 2022, 4: 226–234
- 97 Mishra P, Kumar H, Sahu S, et al. Flexible and wearable optical system based on U-shaped cascaded microfiber interferometer. *Adv Mater Technol*, 2023, 8: 2200661
- 98 Wang X D, Wolfbeis O S. Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2013–2015). *Anal Chem*, 2016, 88: 203–227
- 99 Xiong Y, Xu F. Multifunctional integration on optical fiber tips: Challenges and opportunities. *Adv Photon*, 2020, 2: 064001
- 100 Luo Y, Chen C, Xia K, et al. Tungsten disulfide (WS₂) based all-fiber-optic humidity sensor. *Opt Express*, 2016, 24: 8956–8966
- 101 Zhao C, Liu D, Cai Z, et al. A wearable breath sensor based on fiber-tip microcantilever. *Biosensors*, 2022, 12: 168
- 102 Calcerrada M, García-Ruiz C, González-Herráez M. Chemical and biochemical sensing applications of microstructured optical fiber-based systems. *Laser Photon Rev*, 2015, 9: 604–627
- 103 Vaiano P, Carotenuto B, Pisco M, et al. Lab on fiber technology for biological sensing applications. *Laser Photon Rev*, 2016, 10: 922–961
- 104 Li J, Liu B, Liu J, et al. Low-cost wearable device based D-shaped single mode fiber curvature sensor for vital signs monitoring. *Sens Actuat A-Phys*, 2022, 337: 113429
- 105 Ding Z, Zhang Z. 2D tactile sensor based on multimode interference and deep learning. *Opt Laser Technol*, 2021, 136: 106760
- 106 Hu S, Liang J H, Chen J Y, et al. Highly sensitive vector magnetic fiber sensor based on hyperbolic metamaterials. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2022, 65: 114211
- 107 Shin J, Liu Z, Bai W, et al. Bioresorbable optical sensor systems for monitoring of intracranial pressure and temperature. *Sci Adv*, 2019, 5: eaaw1899
- 108 Bai H, Kim Y S, Shepherd R F. Autonomous self-healing optical sensors for damage intelligent soft-bodied systems. *Sci Adv*, 2022, 8: eabq2104
- 109 Han F, Wang T, Liu G, et al. Materials with tunable optical properties for wearable epidermal sensing in health monitoring. *Adv Mater*, 2022, 34: 2109055

- 110 Wang D, Sheng B, Peng L N, et al. Flexible and optical fiber sensors composited by graphene and PDMS for motion detection. *Polymers*, 2019, 11: 1433
- 111 Guo J, Niu M, Yang C. Highly flexible and stretchable optical strain sensing for human motion detection. *Optica*, 2017, 4: 1285–1288
- 112 Leber A, Cholst B, Sandt J, et al. Stretchable thermoplastic elastomer optical fibers for sensing of extreme deformations. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1802629
- 113 Chandrappan J, Zhang J, Mohan R V, et al. Optical coupling methods for cost-effective polymer optical fiber communication. *IEEE Trans Comp Packag Technol*, 2009, 32: 593–599
- 114 Leal-Junior A G, Diaz C A R, Avellar L M, et al. Polymer optical fiber sensors in healthcare applications: A comprehensive review. *Sensors*, 2019, 19: 3156
- 115 Zheng W, Tao X, Zhu B, et al. Fabrication and evaluation of a notched polymer optical fiber fabric strain sensor and its application in human respiration monitoring. *Textile Res J*, 2014, 84: 1791–1802
- 116 Guo J J, Liu X Y, Jiang N, et al. Highly stretchable, strain sensing hydrogel optical fibers. *Adv Mater*, 2016, 28: 10244–10249
- 117 Liang H H, He Y C, Chen M H, et al. Self-powered stretchable mechanoluminescent optical fiber strain sensor. *Adv Intell Syst*, 2021, 3: 2100035
- 118 Harnett C K, Zhao H, Shepherd R F. Stretchable optical fibers: Threads for strain-sensitive textiles. *Adv Mater Technol*, 2017, 2: 1700087
- 119 Pan J, Jiang C, Zhang Z, et al. Flexible liquid-filled fiber adapter enabled wearable optical sensors. *Adv Mater Technol*, 2020, 5: 2000079
- 120 Zhou J, Shao Q, Tang C, et al. Conformable and compact multi-axis tactile sensor for human and robotic grasping via anisotropic waveguides. *Adv Mater Technol*, 2022, 7: 2200595
- 121 Gupta P, Vermani K, Garg S. Hydrogels: from controlled release to pH-responsive drug delivery. *Drug Discov Today*, 2002, 7: 569–579
- 122 Guo J J, Zhou B Q, Du Z, et al. Soft and plasmonic hydrogel optical probe for glucose monitoring. *Nanophotonics*, 2021, 10: 3549–3558
- 123 Liu T, Ding H, Huang J, et al. Liquid-core hydrogel optical fiber fluorescence probes. *ACS Sens*, 2022, 7: 3298–3307
- 124 Choi M, Humar M, Kim S, et al. Step-index optical fiber made of biocompatible hydrogels. *Adv Mater*, 2015, 27: 4081–4086
- 125 Yang X, Wu Z X, Wei Y M, et al. Anti-freezing and anti-drying organohydrogel coated with graphene for highly sensitive and ultra-stretchable strain sensing. In: Proceedings of the 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers). Orlando, 2021. 1231–1234
- 126 Yu J Y, Moon S E, Kim J H, et al. Ultrasensitive and highly stretchable multiple-crosslinked ionic hydrogel sensors with long-term stability. *Nano-Micro Lett*, 2023, 15: 51
- 127 Wallin T J, Pikul J, Shepherd R F. 3D printing of soft robotic systems. *Nat Rev Mater*, 2018, 3: 84–100
- 128 Xu P A, Mishra A K, Bai H, et al. Optical lace for synthetic afferent neural networks. *Sci Robot*, 2019, 4: eaaw6304
- 129 Yang X, Lan L, Pan X, et al. Electrically conductive hybrid organic crystals as flexible optical waveguides. *Nat Commun*, 2022, 13: 7874

Wearable fiber-optic sensors: Recent advances and future opportunities

ZHAO Lei[†], TAN YingLing[†], LI Hang & CHEN Jin-Hui^{*}

School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China

The past years have witnessed the fast development of wearable electronic sensors, which have broad applications in biomechanics, personal healthcare, electronic skin, and human-machine interface. Nevertheless, conventional electronic sensors suffer from susceptibility to electromagnetic interference, electrochemical corrosion, and electrical safety issues. Compared with electronic devices, optical sensor devices have the advantages of anti-electromagnetic interference and electrical safety, and optical signals have the featured properties of large transmission bandwidth, multiplexing, flexible modulation, and demodulation methods, which show great potential in multi-degree-of-freedom sensing. The research of wearable optical fiber sensors is emerging recently, which can be complementary to electric sensors. This work focuses on the recent advances in wearable fiber-optic sensors, including silica fiber and polymer fiber devices. In the silica fiber section, the sensing mechanism, fabrications, and wearable sensing applications of fiber Bragg gratings and microfiber structures are mainly focused. In particular, microfibers with diameters of tens of nanometers to several micrometers, show many different intriguing properties compared with traditional bulk fibers, such as strong light field confinement, strong evanescent fields, high nonlinearity, and mechanical strength, which are promising for high-dense integration. In the polymer fiber section, the fundamental sensing mechanisms and fiber-optic sensing applications are discussed. Compared with rigid silica fibers, polymer optical fibers have similar mechanical modulus to human tissues, better biocompatibility and stretchability, and they are also easy to process and mix with other functional organic materials, and some polymer materials are also degradable or have the self-healing capability. In addition, the hydrogel fibers for *in vivo* chemical sensing are highlighted. In the final section, it summarizes the pros and cons of typical wearable sensors, and the challenges and future opportunities of this field are discussed.

fiber-optic sensor, wearable device, personal healthcare, human-machine interface

PACS: 42.81.Pa, 42.79.-e, 85.60.Bt, 87.90.+y

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0043](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0043)